

南大西洋被动陆缘沉积物厚度特征与分段对比

潘相茹^{1,2} 李江海^{1,2,†} 陶崇智³ 章雨^{1,2} 杨梦莲^{1,2}

1. 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 北京大学石油与天然气研究中心, 北京 100871; 3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; † 通信作者, E-mail: jhli@pku.edu.cn

摘要 基于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)发布的最新全球沉积物厚度数据, 综合利用被动陆缘盆地、洋底高原和转换断层等地质信息, 识别南大西洋七大沉积中心。南大西洋沉积物厚度整体上呈西厚东薄、北厚南薄的趋势, 按陆缘及盆地特征, 将大西洋两岸盆地从北到南划分为4段: 赤道段、中段、南段和福克兰段, 其中被动陆缘盆地主要分布在前3段。赤道段盆地主要受转换断层控制, 发育三叠系蒸发岩; 中段盆地发育阿普第阶盐沉积, 是油气勘探的重点区域; 南段受火山活动的影响, 以发育向海倾斜反射体为主要特征。

关键词 南大西洋; 被动陆缘; 分段性; 沉积物厚度; 盆地特征

Sedimentary Characteristics and Tectonic Segmentation of the Passive Continental Margin of the South Atlantic Ocean

PAN Xiangru^{1,2}, LI Jianghai^{1,2,†}, TAO Chongzhi³, ZHANG Yu^{1,2}, YANG Menglian^{1,2}

1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution (MOE), School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; 2. Institute of Oil and Gas, Peking University, Beijing 100871; 3. Sinopec Petroleum Exploration and Development Research Institute, Beijing 100083; † Corresponding author, E-mail: jhli@pku.edu.cn

Abstract Seven major sediment centers were recognized based on the Total Sediment Thickness of the World's Oceans and Marginal Seas (NCEI, NOAA), integrated with the research on the passive margin basins, oceanic plateaus, main transform faults. It could be revealed that the western and the northern parts of the South Atlantic Ocean have much thicker sedimentary than the eastern and the southern parts. The nature of sedimentary and tectonic of the passive continental margin and passive continental margin basins were discussed in four segments of South Atlantic Ocean Margin: equatorial segment, central segment, southern segment and Falkland segment. The Equatorial segment was controlled by large transform faults, where the Triassic salt layer developed. The Aptian salt layer was found in the Central segment, which was the key area of oil and gas exploration. Volcanism deeply influenced the Southern segment with the Seaward Dipping Reflectors.

Key words the South Atlantic Ocean; passive continental margin; tectonic segmentation; sediment thickness; sedimentary characteristics

南大西洋两岸被动陆缘油气资源丰富, 一直是全球油气勘探的重点^[1]。据 HIS (Information Handling Services) 数据库 2015 版 (www.ihs.com), 截至 2014 年, 在南大西洋两岸发现桑托斯、尼日尔三角洲等 10 个大的含油气盆地, 对南大西洋被动陆缘盆地的研究成为热点。近 30 年来, 随着勘探技术的进步, 地质数据日益完善, 世界地质图编图委员会、联合

国教科文组织、美国国家航空航天局、美国地质调查局、国际海道测量组织和政府间海洋学委员会、美国国家海洋和大气管理局等机构根据勘探数据, 先后完成侧重点不同的全球尺度大地构造图和海底地貌图, 为地质研究积累了基础数据。本文采用最新的沉积物厚度数据及其他地球物理数据, 探究南大西洋沉积物总体厚度特征, 并分析南大西洋两岸

沉积物厚度差异,在此基础上,结合不同位置盆地剖面图,探究南大西洋被动陆缘盆地沉积特征及分段特性。

1 区域地质背景

南大西洋位于非洲板块与南美洲板块之间,北部以10°N为界,南部以布韦三联点为界。该区域发育24个大型转换断层,洋盆中发育包括特里斯坦在内的12个热点及大火成岩省。普遍认为,南大西洋的张开源于非洲板块及南美板块于早三叠世—侏罗纪时期西冈瓦纳大陆的裂解,非洲板块及南美板块发育一系列的裂谷沉积盆地,记录了洋盆从南向北逐渐张开的演化历史^[2-4]。南大西洋的张开伴随着非洲板块和南美板块的次级板内变形作用。

南大西洋被动陆缘包括非洲西海岸和南美洲东海岸,发育35个被动大陆边缘盆地。南大西洋的演化过程伴随着被动陆缘及陆缘盆地的发育,前人简单地将南大西洋被动陆缘分为4段,自南向北依次为福克兰段、南段、中段和赤道段。文献^[5-8]的研究表明,赤道段是典型的转换型被动大陆边缘:早期具有拉分盆地性质,后期为被动大陆边缘性质盆地;中段为典型的非火山型被动大陆边缘,以伸展断块为特点,岩浆活动微弱,阿普第阶盐沉积广泛分布;南段是典型的火山型被动大陆边缘,大陆架一般比较狭窄,地壳拉伸减薄作用的影响较小,裂谷期火山活动剧烈,发育大量溢流相玄武岩和凝灰岩组成的厚层岩浆地壳。

2 沉积物厚度数据来源

沉积物厚度是反映被动陆缘特征的重要基础数据。本文采用全球大洋及边缘海沉积物厚度数据(Total Sediment Thickness of the World's Oceans and Marginal Seas, Version 1)作为反映南大西洋被动陆缘沉积特征及分段盆地特征的基础数据。该数据由

美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)环境信息中心(National Centers for Environmental Information, NCEI)提供,数据精度为5',其沉积物厚度代表海底表面到声学基底的深度,在某些区域代表沉积物厚度的最小值,单位为m。

该海底沉积物厚度数据有3种主要来源:1)前人发表的沉积物等厚图;2)大洋钻探数据,包括大洋钻探计划(Ocean Drilling Program, ODP)和深海钻探计划(Deep Sea Drilling Project, DSDP)数据;3)由国际地质地球物理图集中的地震数据。

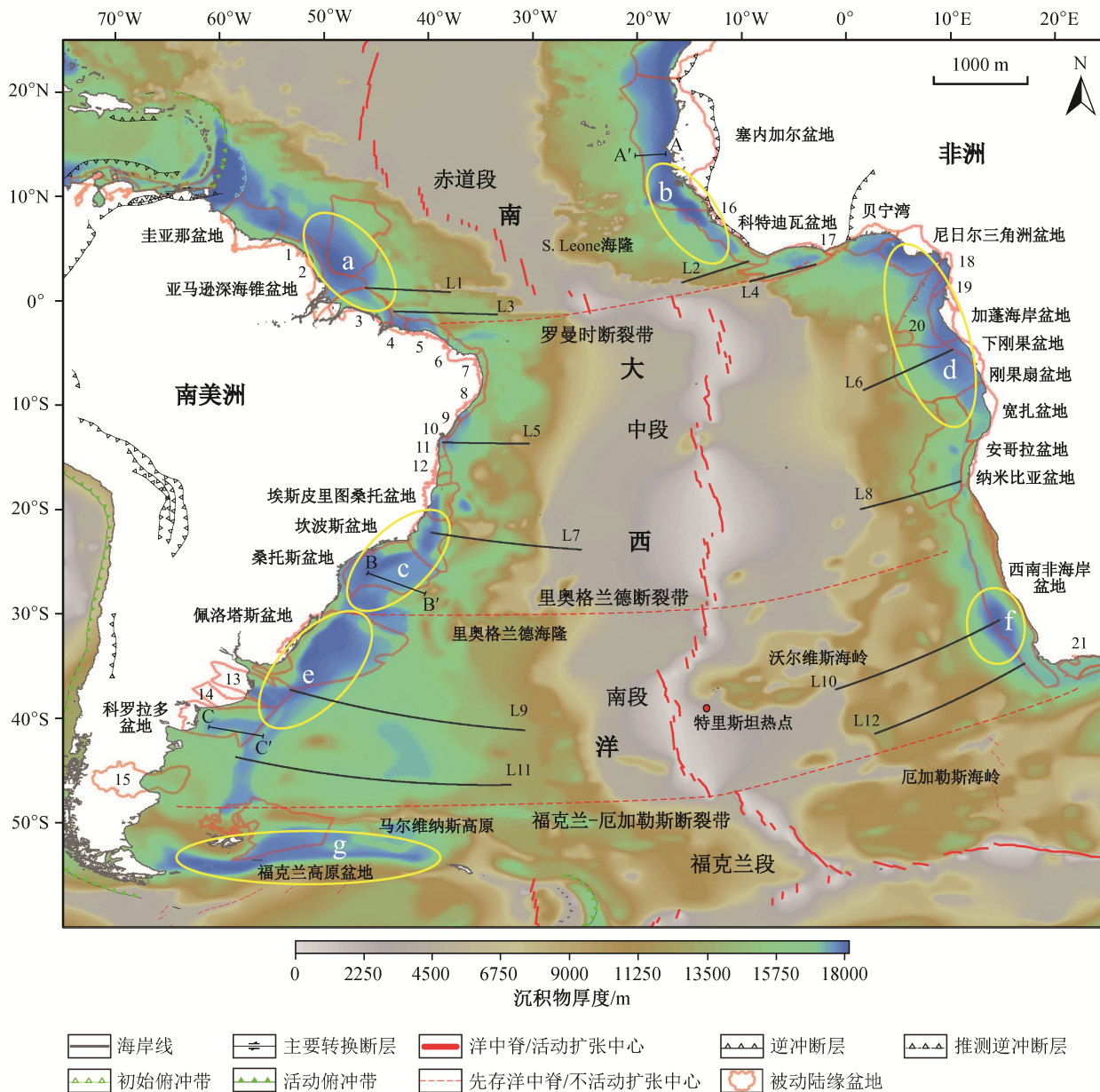
一般来说,大洋沉积物厚度分布的影响因素有以下几个方面:1)下伏地壳的年代;2)洋壳的构造演化过程;3)基地构造趋势;4)沉积物源分布特征;5)沉积物输送过程。为了分析南大西洋沉积物厚度分布特征及被动陆缘分段特征,本文综合洋中脊构造、热点及大火成岩省等数据(数据来源如表1所示),编制南大西洋沉积物厚度分布图(图1)。

3 南大西洋两岸沉积物厚度分布特征

从洋中脊到陆缘,南大西洋沉积物厚度逐渐增大,洋中脊和洋盆内局部增厚。南大西洋洋中脊处沉积物厚度仅为十几米,中段洋中脊附近沉积物最薄,但在13°S附近洋中脊两侧有厚达200m的厚层沉积。洋盆沉积物厚度平均约为100m,洋盆内部的洋底高原、海岭、海隆区域及周边沉积物较厚,其中维尔沃斯海岭沉积物厚度可达500m。南大西洋两侧陆缘是该区域的主要沉积区,如南美洲东北部、东南部陆缘和马尔维纳斯高原以及非洲西北部、西南部和非洲大陆南部,沉积物厚度为3000~7000m,形成圭亚那—亚马逊、桑托斯、佩洛塔斯、福克兰高原、塞内加尔、尼日尔—下刚果以及奥兰治七大沉积中心(图1),这些沉积中心在南大西洋两侧对称地分布。这些沉积区发育对应的陆缘沉积盆

表1 本文研究涉及的数据资料及其来源
Table 1 Submarine geological information and data source involved in this study

序号	地质信息	数据库	来源
1	南大西洋中脊(活动扩张中心)及先存洋中脊(不活动扩张中心)、活动俯冲带及死亡俯冲带等	Geological Map of the World 数据库(3rd Edition, 2010)	Commission for the Geological Map of the World (CGMW)
2	南大西洋洋底主要转换断层及名称	Tellus数据库; Committee on Undersea Feature Names (SCUFN)数据库	International Hydrographic Organization (IHO)
3	热点位置和名称		文献 ^[9]
4	洋底高原和大火成岩省	IHS 数据库	IHS 公司



1. 阿马帕台地; 2. 亚马逊盆地; 3. 马拉尼昂盆地; 4. 巴雷里尼亚斯盆地; 5. 皮奥伊-塞阿拉盆地; 6. 波蒂瓜尔盆地; 7. 帕拉伊巴-伯南布哥盆地; 8. 塞尔希培阿拉戈斯盆地; 9. 巴拉多亚克佩盆地; 10. 阿尔马达卡马慕盆地; 11. 热基蒂尼奥尼亚盆地; 12. 库穆鲁沙蒂巴盆地; 13. 里奥萨拉诺盆地; 14. 克罗莫科盆地; 15. 圣蒙赫盆地; 16. 塞拉利昂利比亚盆地; 17. 索尔特庞德盆地; 18. 杜阿拉盆地; 19. 穆尼盆地; 20. 加蓬-杜阿拉深海盆地; 21. 奥泰尼夸盆地。a. 圭亚那-亚马逊沉积中心; b. 塞内加尔沉积中心; c. 桑托斯沉积中心; d. 尼日尔-下刚果沉积中心; e. 佩洛塔斯沉积中心; f. 奥兰治沉积中心; g. 福克兰沉积中心。L1~L12为图2中测线位置, A-A', B-B'和C-C'为图3中剖面位置

图1 南大西洋沉积物厚度分布图

Fig. 1 Sediment thickness map of the South Atlantic Ocean

地,其中桑托斯、佩洛塔斯和尼日尔-下刚果沉积中心均发现大型油气田,是油气勘探的热点区域^[2]。

南大西洋两岸盆地的沉积物在北部的赤道附近厚度最大,向南减薄,南美洲东岸被动陆缘沉积厚度比非洲西岸大。南大西洋西岸:圭亚那-亚马逊沉积中心沉积物平均厚度达到5000 m,亚马逊深海锥沉积物厚度最大,可达10000 m;向南,桑托斯沉

积中心沉积物平均厚度为2000 m,最厚处在桑托斯盆地南端,可达5000 m;佩洛塔斯沉积中心沉积物平均厚度为3000 m,最厚处在北部的佩洛塔斯盆地,可达7000 m;福克兰沉积中心沉积物最大厚度为5000 m。南大西洋东岸:塞内加尔沉积中心沉积物平均厚度为2500 m,最大厚度为7000 m;尼日尔-下刚果沉积中心沉积物平均厚度为3000 m,最厚处

在尼日尔三角洲盆地,厚度可达8000 m; 奥兰治沉积中心沉积物平均厚度为1500 m, 奥兰治盆地最厚处厚度可达8000 m。

综合大陆及洋底构造信息,我们认为物源的差异是南大西洋现今沉积物厚度不均一的主要因素。在南美洲东岸和非洲西岸大陆边缘,由于有大型水系带来大量陆源碎屑沉积物,因此常发育巨厚的河流三角洲沉积。南大西洋两岸7个沉积中心的6个与陆上大型水系有关,如内格罗河和亚马逊河对应圭亚那-亚马逊沉积中心,圣弗朗西斯河对应桑托斯沉积中心,巴拉那河和巴拉圭河对应佩洛塔斯沉积中心,塞内加尔河对应塞内加尔沉积中心,尼日尔河和刚果河对应尼日尔-下刚果沉积中心,奥兰治河对应奥兰治沉积中心。其中,赤道附近的亚马逊河是世界上流量最大的河流,发育南大西洋两岸最厚的沉积盆地——亚马逊深海锥盆地,沉积物厚度超过10000 m。深海盆地中陆源沉积物较少,仅有极少量的粉砂级和黏土级沉积物随大气环流和大洋环流、浊流以及深海底层流搬运到深海沉积,深海盆地以生物化学沉积物为主,常发育厚层含有孔虫壳体的钙质软泥沉积^[10]。在洋底高原、海岭和海隆等区域,由于海底火山作用和洋流的侵蚀作用,发育较厚的火山碎屑沉积^[11-12]。

为进一步研究南大西洋两岸沉积物厚度特征,借助 GEBCO (the General Bathymetric Chart of the Oceans)提供的全球水深数据和 NOAA 提供的全球沉积物厚度数据,在赤道段、中段和南段6个沉积中心分别截取12个剖面(图2),对比东西向以及南北向不同被动陆缘段的水深特征、基底特征以及沉积物厚度自陆向海的变化趋势。

从图2看出,南大西洋两岸深水盆地的水深在2000~4000 m之间,向南有加深的趋势,总体上西部比东部略深。基底深度在5000~8000 m之间,向南有加深的趋势,东部基底比西部深。南大西洋两岸盆地自陆向海水体深度和基底深度的形态基本上对称,南北段有明显差异。赤道段水体深度从2000 m 骤然加大到4000 m,中段和南段水体深度逐渐加大;赤道段基底有明显隆起,其余两段基底隆起不明显。

沉积物厚度在东西两岸自陆向海基本上对称分布。按照沉积物厚度,自陆向海可分为近陆带、颈部带和远陆带,颈部带即沉积物厚度自陆向海骤然减薄的区域。赤道段颈部带沉积物厚度约为200 m,

两端沉积物增厚,西非沿岸远陆带沉积物厚度可达2000 m。这一特征在两岸有差异,在南美洲东岸盆地,颈部带离陆地较远,距离约为500 km;在西非海岸盆地,颈部带离陆地较近,距离约100 km。中段颈部带不明显,沉积物厚度自陆向海逐渐减小,东西两岸对称性较好。南段颈部带距离陆地约500 km,南美洲东岸颈部带沉积物厚度可达1000 m,远陆带也有厚层沉积,西非一侧颈部带沉积物厚度不足500 m,远陆带沉积物非常薄。

4 南大西洋两岸被动陆缘盆地特征

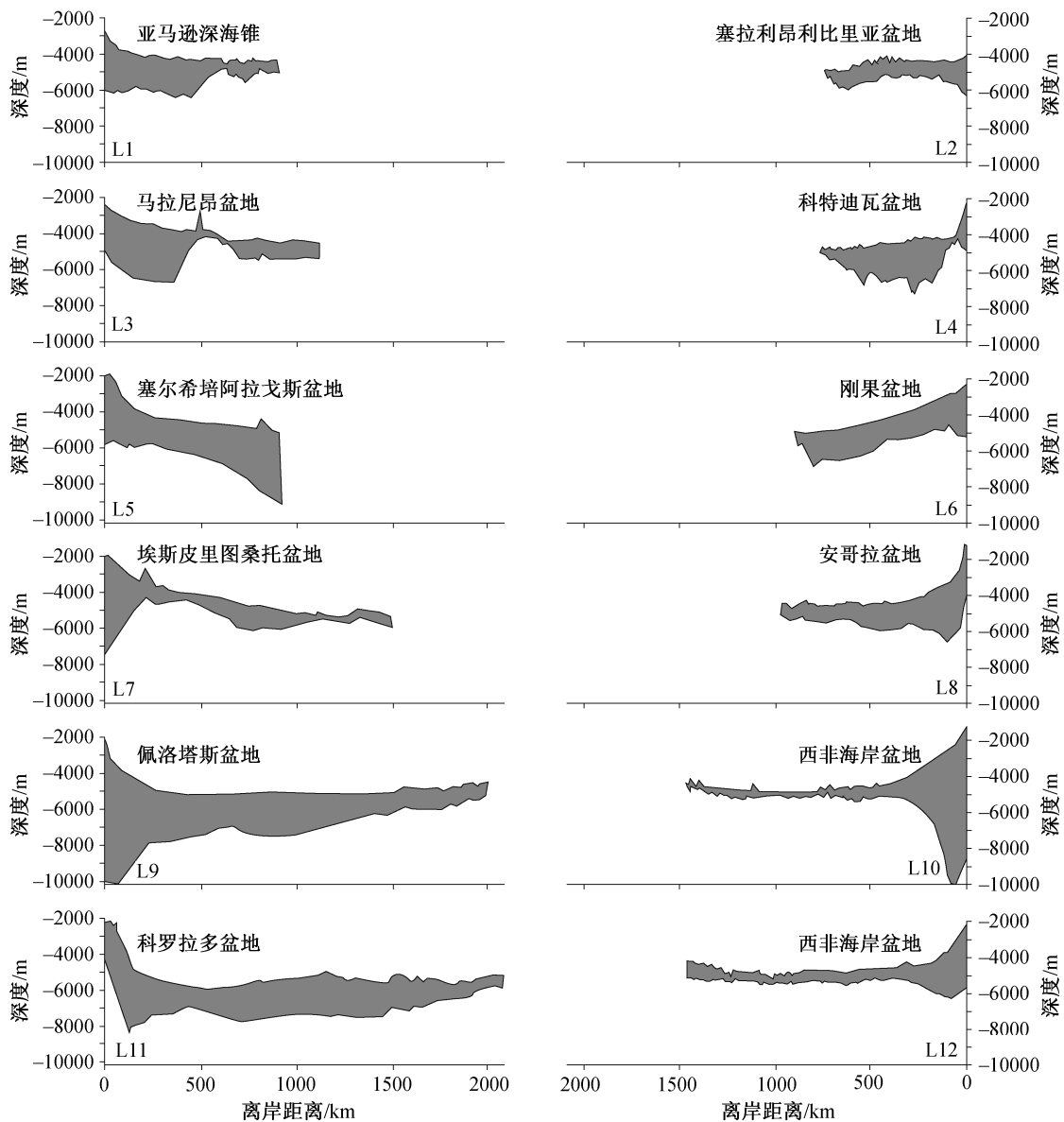
南大西洋赤道段近陆缘一侧发育转换型被动陆缘盆地,远端发育厚层三角洲盆地,盆地格架有窄陆坡、宽陆棚的特征(图3),沉积物在陆坡处迅速减薄,在近陆带及近海陆棚处有厚层沉积。南大西洋中段盆地发育非火山型陆缘盆地,陆坡宽缓,高差小,厚层沉积主要分布在陆缘一侧,远端发育远洋高地带,基底隆起,沉积物减薄,中段发育典型的阿普第阶盐岩沉积,其沉积边缘与海陆交换带基本上吻合。南大西洋南段发育火山型陆缘盆地,陆坡相对宽缓,盆地剖面可见向海倾斜的反射体,分布在海陆交换带处。

4.1 南大西洋陆缘赤道段

南大西洋陆缘赤道段在10°N与罗曼时断裂带之间,包括南美洲东岸的圭亚那-亚马逊和非洲西岸的塞内加尔两个沉积中心,是南大西洋沉积物最厚的区域。圭亚那-亚马逊沉积中心主要沉积盆地有圭亚那盆地和亚马逊深海锥盆地,圭亚那盆地是典型的转换型盆地,亚马逊深海锥盆地接收来自亚马逊河的巨量输入,发育广阔的深海扇。塞内加尔沉积中心主要沉积盆地为塞内加尔盆地,由于受S. Leone海隆限制,沉积物集中在陆缘一侧,并沿大陆边缘呈南北向展布。

赤道段近陆缘发育转换型被动陆缘盆地,这些盆地早期受到马拉松断裂带、维玛断裂带、圣保罗断裂带和罗曼时断裂带等大洋转换断层控制,后期叠加被动陆缘性质的盆地。盆地底部发育大量基底断层,分为两个系统:一是大洋转换断层控制的基底断裂,在靠近陆缘一侧增多,且伴随相交的次级断裂;二是陆内裂陷作用控制的断裂系统,其走向与陆缘平行^[5]。赤道段远离陆缘一侧发育三角洲盆地,如亚马逊深海锥盆地。

塞内加尔盆地陆架宽缓,陆坡较陡,三叠系地



阴影部分代表沉积物, 其上界代表水体深度, 下界代表基底深度; 测线位置见图 1

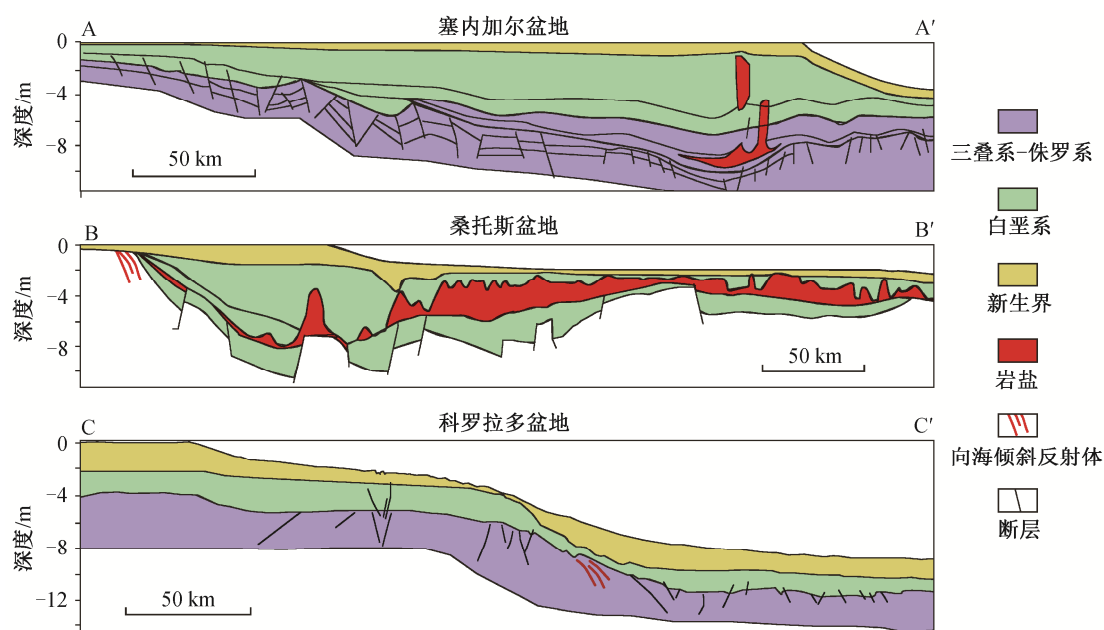
图 2 南大西洋两岸水深及基底深度分布

Fig. 2 Depth of water and basement of South Atlantic Ocean

层构造活动剧烈, 发育大量基底断层。陆缘一侧被向海倾斜的大断层切割, 其间展布小型断层(图 3)。塞内加尔盆地是西非陆缘最大的盆地^[16], 在南大西洋张开之前沉积一套厚约 3000~7000 m 的陆相砾岩-砂岩-粉砂岩古生代基底(图 4), 局部发育浅海页岩沉积; 三叠纪一早侏罗纪南大西洋北部逐渐打开, 塞内加尔盆地沉积厚层蒸发盐, 最大厚度约为 2000 m, 陆缘一侧发育陆相砂岩沉积; 中上侏罗统至新近系发育浅海相碳酸盐, 局部过渡为陆相碎屑岩, 与三叠纪蒸发盐不整合接触。

4.2 南大西洋陆缘中段

南大西洋陆缘中段在罗曼时断裂带与里奥格莱德断裂带之间, 发育桑托斯和尼日尔-下刚果两个沉积中心。桑托斯沉积中心的沉积物厚度自北向南呈增厚的趋势, 最南部的桑托斯盆地沉积物最厚, 其厚度可达 7500 m。非洲西岸最北部的尼日尔盆地沉积物最厚, 其厚度可达 11500 m, 与尼日尔河的注入有关。向南, 各盆地沉积物厚度减小, 纳米比亚盆地沉积物最薄, 沉积中心的沉积物厚度约为 3000 m。



据文献[13-15]修改; 剖面位置见图 1

图 3 南大西洋被动陆缘盆地剖面图

Fig. 3 Passive continental basins profiles of the South Atlantic Ocean

南大西洋陆缘中段被动陆缘盆地广泛发育阿普第阶盐沉积, 分布在 0° — 10° S 的非洲西岸盆地及 15° — 25° S 的南美洲东岸盆地。南美洲东岸的阿普第阶盐沉积呈北窄南宽的特征, 南部桑托斯盆地最宽可达 $300\text{ km}^{[13]}$, 非洲西岸南北分布均匀, 平均宽度为 200 km 。最典型的阿普第阶盐沉积分布在巴西陆缘, 从桑托斯盆地南部一直向北延伸到塞尔希培—阿拉戈斯盆地, 主要包括桑托斯盆地、坎波斯盆地和圣埃斯皮里图桑托盆地, 巨量蒸发盐省的北部界限延伸到桑托斯盆地北部, 巴西大陆边缘盆地在晚白垩世及新生代的沉积并没有加剧岩盐的向海流动, 因此可以将盐岩沉积的界限与海陆转换带(COB)的界限相等同。西非被动陆缘盐岩沉积从北到南依次是里约穆尼盆地、加蓬盆地、下刚果盆地和宽扎盆地, 分别是巴西陆缘的塞尔希培—阿拉戈斯盆地、巴拉多亚克佩盆地、埃斯皮里图桑托盆地和坎波斯盆地的共轭盆地。阿尔必阶海相盐沉积主要分布在巴西的桑托斯盆地、西非的刚果盆地和宽扎盆地, 桑托斯盆地的盐岩沉积最厚^[18-19]。

受特里斯坦热点影响, 桑托斯盆地基底是早于巴拉那盆地陆壳溢流玄武岩($133\sim 130\text{ Ma}$)形成的下白垩统玄武岩和凝灰岩, 其上发育一套自陆向海的砾岩—砂岩—泥页岩沉积序列^[20], 厚度约为 1500 m (图 5)。到上白垩统阿普第阶沉积时期, 受南部里

里奥格莱德—沃尔维斯海岭的阻隔, 南大西洋中段长期处于欠补偿状态, 发育巨厚的湖相碳酸盐岩和蒸发岩沉积, 最大厚度可达 2500 m 。到上白垩统阿尔必阶沉积时期, 南大西洋逐渐打开, 南部海隆的阻隔逐渐消失, 海水灌入, 主要发育厚层浅海相碳酸盐岩, 陆缘一侧发育砂岩和砾岩。阿尔必阶盐沉积的最大厚度可达 $4000\text{ m}^{[3,6]}$ 。上白垩统赛诺曼阶到马斯特里赫特阶发育一套海退序列, 陆缘一侧发育砂砾岩, 深海部位发育深海泥页岩。古近系到新近系发育厚达 2700 m 的海进序列, 自陆向海依次发育砂岩、泥灰岩和泥岩。

南大西洋中段两岸盆地向海倾斜反射体的分布不同。向海倾斜反射体通常出现在正常洋壳与正常陆壳之间的转换带, 标志着强烈的岩浆火山活动。从南大西洋中段被动陆缘盆地的地震反射剖面可以观察到向海倾斜的反射体, 分布在阿普第阶盐沉积下部, 东岸盆地未观察到向海倾斜反射体^[23], 这可能与早白垩纪(132 Ma)特里斯坦(Tristan)热点的迁移有关。阿普第阶(125 Ma)之前, 特里斯坦热点靠近南美洲巴拉那次板块, 岩浆活动主要影响桑托斯和佩洛塔斯等盆地, 在盆地的地震反射剖面可见向海倾斜反射体。到晚白垩世坎帕期, 里奥格兰德海隆和维尔沃斯海岭发育完全, 特里斯坦热点在洋中脊附近。早第三纪, 特里斯坦热点及相关的岩浆活

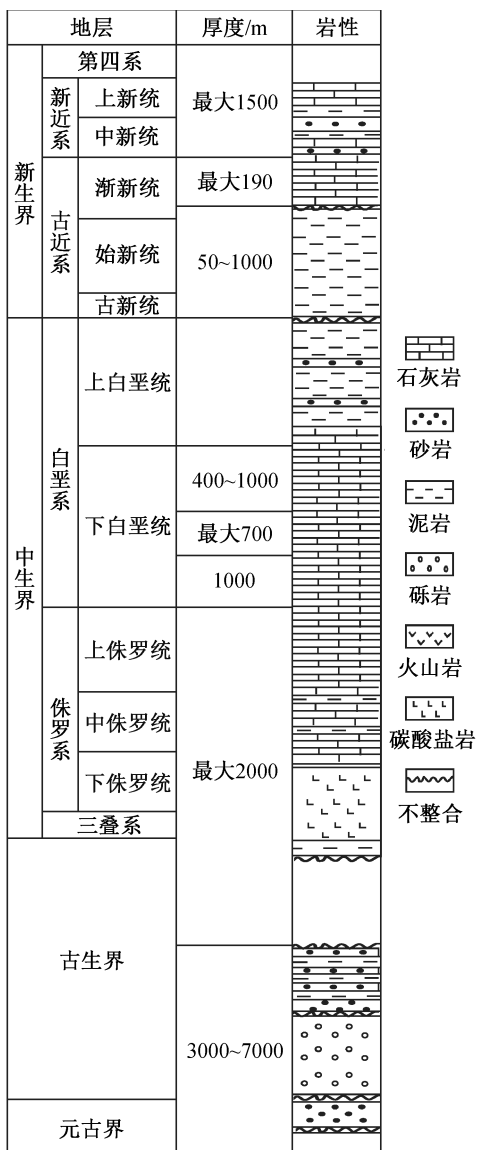


图 4 塞内加尔盆地地层柱状图(据文献[17]修改)
Fig. 4 Stratigraphic histogram of Senegal Basin (modified after Ref. [17])

动跨过洋中脊到达非洲板块西部, 形成 Etendeka 岩浆岩省^[3], 因此在西非陆缘盆地盐下地层没有发现向海倾斜反射体。

4.3 南大西洋陆缘南段

南大西洋陆缘南段在里奥格兰德断裂带与福克兰-厄加勒斯断裂带之间, 发育佩洛塔斯和奥兰治两个沉积中心。南美洲东岸佩洛塔斯沉积中心最北部的佩洛塔斯盆地由于接受陆上巴拉圭河和巴拉那河沉积物质输送, 形成超过 8000 m 的巨厚沉积层, 是南段沉积物厚度最大的盆地, 向南各盆地沉积物厚度减小, 沉积中心的厚度为 3000~4000 m。非洲

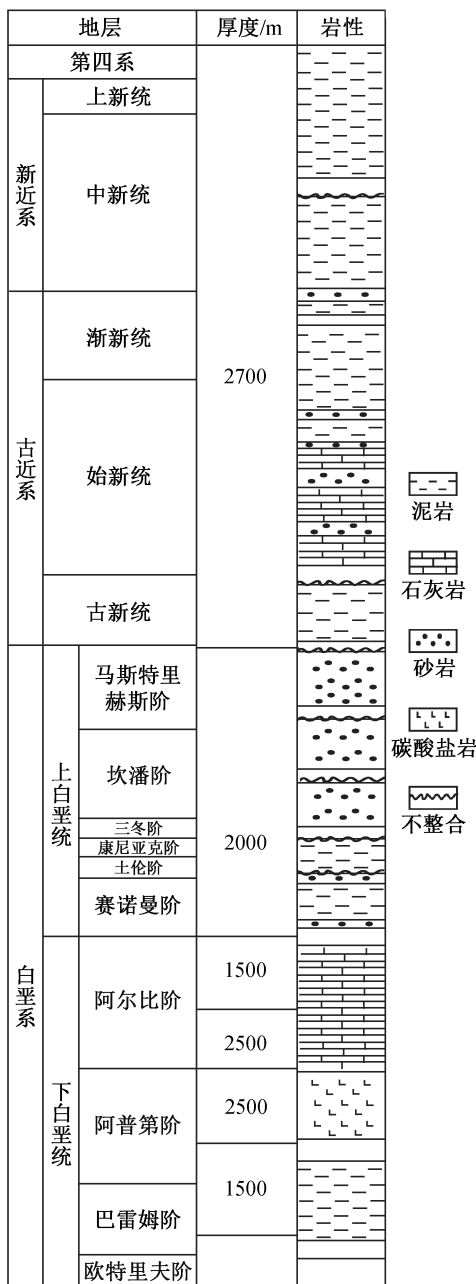


图 5 桑托斯盆地地层柱状图(据文献[21-22]修改)
Fig. 5 Stratigraphic histogram of Santos Basin (modified after Ref. [21-22])

西岸被动陆缘盆地主要是狭长的沿岸盆地, 奥兰治沉积中心沉积物厚达 6000 m。

南大西洋陆缘南段被动陆缘盆地在地震反射剖面上可见大规模的向海倾斜反射体, 厚度超过 5000 m, 宽度达 60~120 km, 呈楔状插入早白垩系地层之下^[24-25], 分布在海陆转换带, 标志着南大西洋张开过程中强烈的岩浆活动。另外, 南大西洋陆缘南段在南大西洋张开之后沉降量较小^[26]。

科罗拉多盆地的基底是早古生代挤压基底，主要是一系列叠瓦状的逆冲岩席和不对称褶皱(图 6)，其上覆盖上二叠统的陆缘碎屑岩、黑色页岩和浅海相石灰岩^[15]，早白垩纪南大西洋张开，科罗拉多盆地沉积一套陆相砂岩-粉砂岩碎屑沉积，局部发育砾岩。晚白垩纪主要沉积一套海相砾岩、砂岩和泥岩，局部发育浅海相碳酸盐岩。古近纪进一步海侵，盆地发育半浅海相页岩和泥岩-泥灰岩沉积。新近纪发育含海绿石的砂岩沉积及河流相-三角洲相沉积，推测与陆上拉普拉塔河第四纪以来的沉积输送有关。

5 结论

本文利用全球沉积物厚度数据编制南大西洋沉积物厚度图，描述南大西洋两岸沉积物厚度分布特征及盆地分段性，并结合南大西洋两岸重点盆地的典型剖面，探究各个分段盆地的演化特征。主要结论如下。

1) 南大西洋被动陆缘盆地可划分为七大沉积中心，整体上呈现北部沉积物较厚、南部沉积物较薄的特征，并且，南美洲东岸陆缘沉积厚度比非洲东岸大，赤道段是南大西洋陆缘盆地沉积最厚的区域，亚马逊深海锥盆地沉积中心沉积物厚度达到 10000 m。

2) 南大西洋两岸的水体深度、基底深度和沉积物厚度变化均有差异。西岸水体和基底深度更大，沉积物厚度变化较小；东部沉积物厚度变化大，赤道段和南段有明显的颈部带。沉积物厚度整体上具有良好的对称性。

3) 南大西洋沉积物厚度变化从北向南有明显差异。赤道段颈部带明显，近陆带和远陆带沉积较厚，中段沉积物自陆向海逐渐减薄，南段近陆带沉积物最厚，颈部带和远陆带较薄，南段在南大西洋张开后沉降量较小。

4) 南大西洋被动陆缘盆地赤道段基底受大型转换断层控制，陆架宽缓，陆坡较陡，三叠系地层受剧烈构造活动的影响较大；中段盆地广泛发育厚层阿普第阶盐沉积，在南美洲东岸南宽北窄，在西非沿岸南北分布均匀，盐岩界限与海陆转换带一致；南段盆地广泛发育向海倾斜的反射体，标志着南大西洋张开过程中强烈的岩浆活动。

参考文献

- [1] 张光亚, 温志新, 梁英波, 等. 全球被动陆缘盆地构造沉积与油气成藏: 以南大西洋周缘盆地为例. 地学前缘, 2014, 21(3): 18-25
- [2] Daly M C, Chorowicz J, Fairhead J D. Rift basin evolution in Africa: the influence of reactivated steep basement shear zones. Geological Society London Special Publications, 1989, 44(1): 309-334
- [3] Torsvik T, Rouse S, Labails C, et al. A new scheme for the opening of the South Atlantic Ocean and the dissection of an Aptian salt basin. Geophysical Journal International, 2009, 177: 1315-1333
- [4] Moulin M, Aslanian D, Unternehr P. A new starting point for the South and Equatorial Atlantic Ocean. Earth-Science Reviews, 2010, 98: 1-37
- [5] 秦雁群, 张光亚, 巴丹, 等. 转换型被动陆缘盆地地质特征与深水油气聚集规律: 以赤道大西洋西非边缘盆地群为例. 地学前缘, 2016, 23(1): 229-239
- [6] Marzoli A, Melluso L, Morra V, et al. Geochronology and petrology of Cretaceous basaltic magmatism in

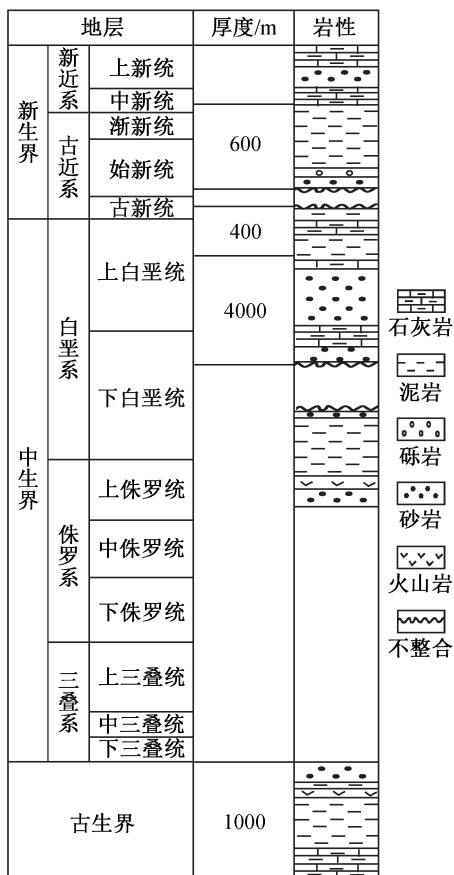


图 6 科罗拉多盆地地层柱状图(据文献[27]修改)
 Fig. 6 Stratigraphic histogram of Colorado Basin (modified after Ref. [27])

- the Kwanza basin (western Angola), and relationships with the Parana-Etendeka continental flood basalt province. *Journal of Geodynamics*, 1999, 28(4/5): 341–356
- [7] Eagles G. New angles on South Atlantic opening. *Geophysical Journal International*, 2007, 168(1): 353–361
- [8] Marcano G, Anka Z, Primio R D. Major controlling factors on hydrocarbon generation and leakage in South Atlantic conjugate margins: a comparative study of Colorado, Orange, Campos and Lower Congo basins. *Tectonophysics*, 2013, 604(5): 172–190
- [9] Muller R D, Sdrolias M, Gaina C, et al. Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2008, 9(4): doi: 10.1029/2007GC001743
- [10] Whittaker J M, Afonso J C, Masterton S, et al. Long-term interaction between mid-ocean ridges and mantle plumes. *Nature Geoscience*, 2015, 8(6): 479–483
- [11] 李江海, 张华添, 李洪林. 印度洋大地构造背景及其构造演化——印度洋底大地构造图研究进展. *海洋学报*, 2015, 37(7): 1–14
- [12] 李江海, 李洪林, 韩喜球. 印度洋底大地构造图及说明书. 北京: 地质出版社, 2015
- [13] Andel T H V, Thiede J, Sclater J G, et al. Depositional history of the South Atlantic Ocean during the last 125 million years. *Journal of Geology*, 1977, 85(6): 651–698
- [14] Contreras J, Zühlke R, Bowman S, et al. Seismic stratigraphy and subsidence analysis of the southern Brazilian margin (Campos, Santos and Pelotas basins). *Marine & Petroleum Geology*, 2010, 27(9): 1952–1980
- [15] Franke D, Neben S, Schreckenberger B, et al. Crustal structure across the Colorado basin, offshore Argentina. *Geophysical Journal International*, 2018, 165(3): 850–864
- [16] Wissmann G. Stratigraphy and structural features of the Continental Margin basin of Senegal and Mauritania // von Rad U, Hinz K, Sarnthein M, et al. *Geology of the Northwest African continental margin*. Berlin: Springer, 1982: 160–181
- [17] Chamley H, Debrabant P, Flicoteaux R. Comparative evolution of the Senegal and eastern central Atlantic basins, from mineralogical and geochemical investigations. *Sedimentology*, 1988, 35(1): 85–103
- [18] Karner G D. Rifts of the Campos and Santos basins, southeastern Brazil: distribution and timing. *AAPG Memoir*, 2000, 73: 301–315
- [19] Garcia S F D M, Letouzey J, Rudkiewicz J L, et al. Structural modeling based on sequential restoration of gravitational salt deformation in the Santos Basin (Brazil). *Marine & Petroleum Geology*, 2012, 35(1): 337–353
- [20] Guerra M C M, Underhill J R. Role of halokinesis in controlling structural styles and sediment dispersal in the Santos basin, offshore Brazil. *Geological Society London Special Publications*, 2012, 363: 175–206
- [21] Duarte C S L, Viana A R. Santos drift system: stratigraphic organization and implications for late Cenozoic palaeocirculation in the Santos basin, SW Atlantic Ocean. *Minerva Pediatrica*, 2007, 276(1): 171–198
- [22] Williams B G, Hubbard R J. Seismic stratigraphic framework and depositional sequences in the Santos basin, Brazil. *Marine & Petroleum Geology*, 1984, 1(2): 90–104
- [23] Jackson M P A, Cramez C, Fonck J M. Role of subaerial volcanic rocks and mantle plumes in creation of South Atlantic margins: implications for salt tectonics and source rocks. *Marine & Petroleum Geology*, 2000, 17(4): 477–498
- [24] Gladchenko T P, Hinz K, Eldholm O, et al. South Atlantic volcanic margins. *Journal of the Geological Society*, 1997, 154(3): 465–470
- [25] Torsvik T H. Large igneous provinces generated from the margins of the large low-velocity provinces in the deep mantle. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 2010, 167(3): 1447–1460
- [26] Nirrengarten M, Gernigon L, Manatschal G. Lower crustal bodies in the More volcanic rifted margin: geophysical determination and geological implications. *Tectonophysics*, 2014, 636: 143–157
- [27] Dietrich J D, Johnson R C. Simplified stratigraphic cross sections of the Eocene Green River Formation in the Piceance basin, northwestern Colorado. *University of Sheffield*, 2013, 33(16): 6782–6790