

巴西桑托斯盆地盐下构造单元 划分原则与方案刍议

史卜庆¹, 范国章², 邵大力², 王红平², 赵俊峰¹, 刘亚明³, 左国平²,
王朝锋², 杨柳², 马宏霞², 丁梁波²

1 中国石油国际勘探开发公司; 2 中国石油杭州地质研究院; 3 中国石油勘探开发研究院

摘要 桑托斯盆地历经早白垩世早期克拉通拗陷盆地、早白垩世早—中期裂谷盆地、早白垩世晚期阿尔必至全新世大陆边缘盆地3个演化阶段,石油资源主要富集于裂谷盆地的生储盖组合中,目前的盆地构造单元划分方案不能够准确地反映裂谷期的构造格局。根据最新的重磁、地震、钻井、大洋钻探等基础资料,提出了桑托斯盆地盐下构造单元划分的新方案:①以晚断陷期主要断裂和沉积特征作为划分一级构造单元的依据,根据断裂分布结合晚断陷期沉积厚度600 m等值线确定隆起与拗陷的边界;②以晚断陷期次级断裂和沉积特征作为划分二级构造单元的依据,根据同沉积拉张断裂、二级走滑断裂及其调节断裂分布,结合晚断陷期和早拗陷期沉积厚度1000 m等值线确定凸起和凹陷的边界;③将盆地划分为“二隆三拗”5个一级构造单元,包括西部拗陷、阿—乌隆起、中央拗陷、卢—苏隆起和东部拗陷,并进一步划分为38个二级构造单元。以裂谷盆地构造演化特征为主要依据划分的构造单元对未来油气勘探选区和资源评价具有重要意义。

关键词 构造单元划分; 盐下; 裂谷盆地; 桑托斯盆地; 巴西

中图分类号: P618.130.2 **文献标识码**: A

0 前言

盆地构造格局是控制油气成藏的关键因素,构造单元划分是含油气盆地石油地质研究的重要内容,正确、合理的构造单元划分,有利于正确认识油气的形成和分布,也是勘探部署的基础^[1-5]。巴西桑托斯盆地是全球深水领域石油最为富集的大陆边缘盆地,自2006年卢拉油田发现以来,成为国际大油公司高度关注的深水油气勘探热点^[6-11]。关于其构造格局,国外学者注重盆地演化和油气系统研究^[12-26],发表了大量关于盆地形成演化、成藏要素、油气勘探方向等方面的文章,但尚未提出完整的盆地构造单元划分方案;国内学者关注盆地隆拗格局与构造单元划分,但仅限于一级构造单元,较少论及二级构造单元,而且基础资料不足与研究领域局限,造成提出的盆地划分方案存在较大的差异,在构造单元界限上存在较大分歧,对油气勘探的指导意义不够^[27-44]。

桑托斯盆地以往的构造单元划分方案,融合了裂谷盆地期和大陆边缘期构造演化的双重格局,缺乏对构造单元边界的明确定义。例如,圣保罗高地(亦称外部隆起带)^[19],其形成受到大陆边缘盆地期地幔隆升和盐岩变形作用双重影响,既不能够准确反映裂谷期盆地构造格局,也不能够准确反映大陆边缘盆地期构造格局。又如,西部隆起带现今为陆架区,在裂谷盆地期和大陆边缘盆地期为继承性隆起,但其范围涵盖包含了部分裂谷盆地期的拗陷区;西部拗陷带现今也位于陆架区,应该反映裂谷期的构造特征,但其范围涵盖包含了大量裂谷盆地期沉积缺失区;东部隆起带体现的是现今构造格局,但其范围包含了裂谷盆地期拗陷的后期抬升区^[10-11],这导致现今划分的裂谷盆地期中部拗陷带缺失部分拗陷范围。另外,以往的盆地构造单元划分方案,缺少对主要依据是裂谷盆地期构造特征还是大陆边缘盆地期构造特征的说明,无论是对隆拗格局的定义,还是

收稿日期: 2021-06-08; 改回日期: 2021-08-23

本文受中国石油天然气集团有限公司科技项目“海外深水、超深水油气勘探关键技术研究”(编号:2021DJ2403)资助

第一作者: 史卜庆, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事海外油气勘探开发部署研究。通信地址: 100034 北京市西城区阜成门北大街6号-1; E-mail: shbpq@petrochina.com.cn

通信作者: 范国章, 博士, 高级工程师, 主要从事深水油气勘探地质研究。通信地址: 310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号; E-mail: fangz_hz@petrochina.com.cn

对构造单元边界的界定,缺乏统一和明确的原则。

针对前人关于桑托斯盆地构造单元划分存在的问题与不足,在充分消化已掌握的盆地重磁、地震、钻井和大洋钻探等资料的基础上,结合近年来桑托斯盆地地质构造和沉积充填方面的研究成果,提出了桑托斯盆地盐下构造单元划分的新方案,以期更客观、合理地阐明桑托斯盆地盐下地层的构造格局,进一步指导盐下的油气勘探开发。

1 盆地概况

桑托斯盆地位于巴西东部海域(图1),西接美洲大陆,东连大西洋壳,是南大西洋中段面积最大的大陆边缘盆地。国外许多学者对盆地形成与演

化过程进行了整体研究,并重点关注近年获得大油气发现的圣保罗高地(外部隆起带)^[19]。康洪全等^[11]将盆地划分为“二隆三拗”,自西向东分别是:西部拗陷带、西部隆起带、中部拗陷带、东部隆起带、东部拗陷带。其中的东部隆起带大体对应国外学者所称的外部隆起带,中部拗陷带大体对应外部隆起带西缘的现今负地形带。

关于桑托斯盆地的构造属性,从板块演化的角度,它是南大西洋中段大陆边缘盆地的一部分,与北部的坎波斯盆地、圣埃斯皮里图盆地,以及与其共轭的西非下刚果盆地、宽扎盆地、纳米贝盆地具有成因上的联系,因桑托斯、坎波斯和圣埃斯皮里图3个盆地均发育厚层盐岩,通常称为大坎波斯盆地。

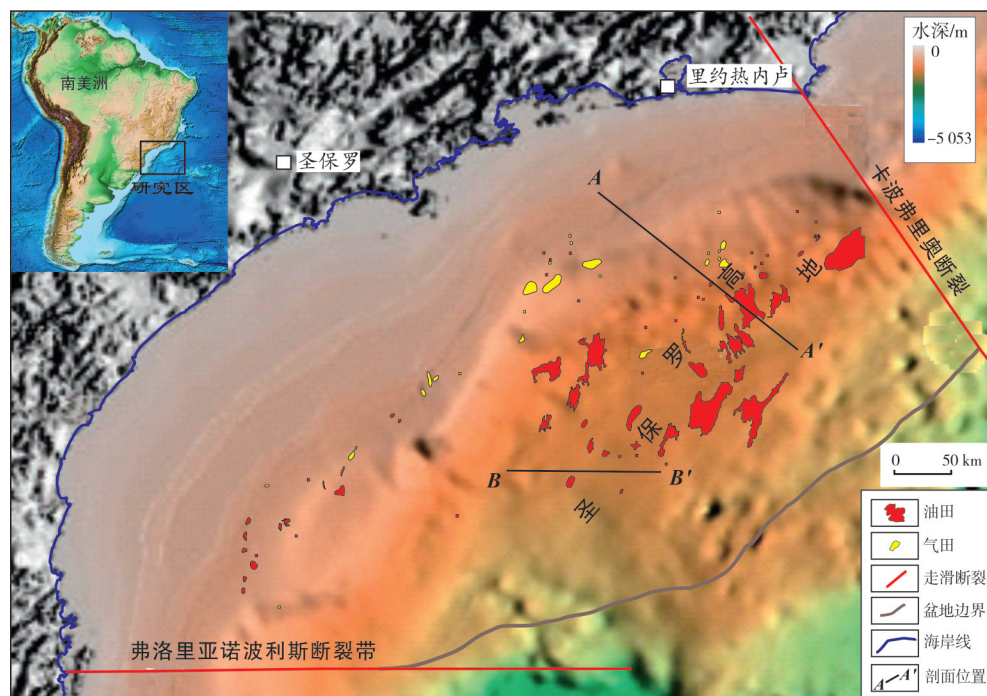


图1 桑托斯盆地地理位置图(引自文献[17],有修改)

Fig. 1 Geographic location map of Santos Basin (cited from reference[17], modified)

桑托斯盆地在白垩系基底之上形成,经历了克拉通拗陷期、裂谷期和被动大陆边缘期等三期演化和叠置,及大陆构造作用和洋壳构造作用复合的复杂地质过程,形成现今丰富多样的地质构造。其中,盆地裂谷阶段形成的盐下成藏组合油气最为富集,油藏单体规模大,储量品质优。

2 含油气盆地构造单元划分原则

含油气盆地的构造单元划分方案往往是随着油气勘探的深入和基础地质资料的积累逐渐精细

化和不断完善的。构造单元划分的依据主要是构造因素,同一构造单元在形成演化和构造属性上应当具有成因联系,非地质构造因素往往不能用于构造单元划分。针对桑托斯盆地构造演化和沉积充填的特点,提出6个构造单元划分的原则,用于确定盆地的一级构造单元和二级构造单元。

2.1 以裂谷盆地构造特征为主要依据确定构造单元

首要考虑裂谷盆地特征基于2个方面的原因:

①桑托斯盆地主要油气系统的生储盖组合发育在裂谷盆地期(包括断陷期和坳陷期)。主力生烃坳陷沉积充填始于早断陷期,定型于晚断陷期,形成了隆坳相间的构造格局,控制了主湖区的分布与沉积特征,进而控制了生烃坳陷的展布。主要勘探目的层发育在早坳陷期,优质规模储层发育在继承性古隆起高部位和走滑断裂形成的微正地貌区;次要勘探目的层发育在晚断陷期,优质规模储层发育在古隆起高部位,与坳陷期广泛发育储层相比,此时的地貌特征决定了储层分布的局限性。主要直接盖层盐岩层发育在晚坳陷期,大陆边缘盆地期的泥岩和灰岩盖层可以作为次要盖层。②桑托斯盆地主要勘探目标为盐下油藏,大陆边缘盆地期以整体构造抬升、差异沉降作用为主,大多数分布于裂谷盆地期古隆起背景上的构造圈闭的原构造形态得以继承和保留。

2.2 以裂谷盆地晚断陷期隆坳格局为关键要素划分构造单元

裂谷盆地发育过程可以划分为断陷期和坳陷期,断陷期是隆坳格局形成的主要时期,坳陷期以整体沉降为主。根据构造特征的差异,断陷期划分为早晚两期:早断陷期断裂活动强,形成隆起和坳陷相间的总体构造格局,隆起和坳陷规模相对较小;在晚断陷期,部分断裂持续发育为同沉积断裂,部分断裂停止活动,盆地发育为隆坳相间的构造格局,隆起和坳陷的规模差异化发育,在盆地中部发育的坳陷规模最大,其两翼发育的隆起宽度大、延伸长,向两侧盆地边缘过渡为窄隆和窄坳相间排列的构造特征。

2.3 以晚断陷期主要断裂和沉积特征为依据确定隆坳边界

控制隆起和坳陷的主要断裂是持续发育的同沉积断裂,沉积充填在隆起和坳陷过渡区表现为连续渐变特征。因此,在将断裂分布作为构造单元边界的同时,需要结合沉积特征确定隆坳的边界。结合隆起区储层分布与厚度、坳陷区主力烃源区沉积厚度、区域与局部地层剥蚀作用,参考钻井标定的高分辨率重力和地震资料,在现今盐下主要目的层构造图基础上,将晚断陷期沉积厚度 600 m 等值线作为隆起与坳陷的边界,其既能够较好区分主要储层和主力烃源岩的分布范围,又基本不受大陆边缘盆地期构造作用的影响。

2.4 以晚断陷期次级断裂和沉积特征为主要依据确定凸起与凹陷边界

桑托斯盆地的盐下勘探目标不仅分布在继承性大隆起上,也分布在低凸起以及盆地两侧窄隆的局部构造上,因此有必要进一步划分凸起和凹陷等二级构造单元。参考隆坳边界的确定原则,依据大量钻井揭示的沉积储层分布以及凸起与凹陷的沉积过渡特征,基于断陷晚期次级断裂的展布规律,将晚断陷期和早坳陷期沉积厚度 1000 m 等值线作为边界,圈定凸起和凹陷的范围,这样确定的凸起能够较好反映晚断陷期和早坳陷期的储层分布。

2.5 以早断陷期走滑断裂确定分段边界

根据钻井和重磁、地震综合解释,盆地走滑分段特征的雏形始于早断陷期,定型于晚断陷期,并在被动大陆边缘盆地阶段继承性活动。一级走滑断裂为盆地边界,二级走滑断裂为隆起和坳陷的分段边界,三级走滑断裂为凸起和凹陷的分段边界。2个一级走滑断裂控制了盆地的南北边界:弗洛里亚诺波利斯(Florianopolis)断裂以南为佩罗塔斯盆地,以北为桑托斯盆地,与走滑断裂伴生的弗洛里亚诺波利斯台地阻挡了裂谷盆地早期南部海水注入桑托斯盆地,以及控制了晚期海水的间歇性注入作用;卡波弗里奥(Cabo Frio)断裂以北为坎波斯盆地,以南为桑托斯盆地,与走滑断裂伴生的卡波弗里奥台地阻挡了裂谷盆地期大量陆源碎屑物质注入桑托斯盆地。6个二级走滑断裂控制了隆起和坳陷的分段发育特征,以卢拉(Lula)北走滑断裂为例,走滑断裂以北构造走向近于东西向,而其南以北西—南东向为特征。三级走滑断裂控制了坳陷或隆起内的凸凹分布,凸起通常沿二级走滑断裂的调节断裂分布,以卢拉北和苏格洛夫(Sugar Loaf)南走滑断裂为例,其间中央坳陷发育的四个凸起为北西—南东走向,延伸至两端二级走滑断裂终止。另外,四级走滑断裂控制局部构造边界,最为典型的是盆地东部窄隆窄坳相间部分,每个局部构造南北两端均发育走滑断裂,钻井证实这些构造形成于晚断陷期,并控制了晚断陷期和早坳陷期的规模储层分布。

2.6 地质与地理信息相结合命名构造单元

构造圈闭是桑托斯盆地盐下油气勘探的首选目标,本文以2个主要或最大构造圈闭为标志命名

一级构造单元中的隆起和二级构造单元中的凸起。坳陷是已证实和潜在烃源岩的主要发育区,以地理信息相对性为主命名坳陷和凹陷两级构造单元。一级走滑断裂沿用前人命名,二级走滑断裂自北向南采用大写罗马数字依次编号,三级走滑断裂自北向南采用小写罗马数字依次编号。为了准确表述不同断裂,本文也采用地质构造与地理信息相结合的方式,如卢拉北断裂为II号走滑断裂、苏格洛夫南断裂为IV号走滑断裂。

3 桑托斯盆地构造单元划分方案

3.1 划分5个一级构造单元

根据以上划分原则和命名方法,将桑托斯盆地划分为5个一级构造单元,包括2个隆起:阿-乌隆起、卢-苏隆起,3个坳陷:中央坳陷、西部坳陷、东部坳陷(图2)。隆起以其发育的2个最大凸起的名首字来命名,阿-乌隆起以阿拉姆(Aram)凸起和乌拉普鲁(Uirapuru)凸起命名,卢-苏隆起以卢拉凸起和苏格洛夫凸起命名,以示与前人划分的东部隆起带和西部隆起带的差异。坳陷以地理相对方位信息来命名,中央坳陷位于盆地中部,西部坳陷位于盆地西部,东部坳陷位于盆地东部,其名称与前人文

献中的命名相近,但定义坳陷的依据和范围存在较大的差异。

3.2 划分38个二级构造单元

将阿-乌隆起划分为8个凸起,即:亚特兰大(Atlanta)凸起、塔姆巴(Tambau)凸起、乌拉普鲁凸起、撒格他里欧凸起、阿拉姆凸起、尼昂(Neon)凸起、卡拉维拉(Caravela)凸起和卡拉维拉南凸起。将卢-苏隆起划分为6个凸起,即:卡波弗里奥凸起、梅罗(Mero)凸起、爱他普(Atapu)凸起、卢拉凸起、卢拉南凸起和苏格洛夫凸起。将西部坳陷划分为2个凸起和3个凹陷:若因维利(Joinville)凸起、麦一莫(Mexihao-Merluza)凸起和若因维利西凹陷、若因维利东凹陷、阿-乌西凹陷。将中央坳陷划分为7个凹陷和7个凸起:卡波弗里奥凹陷、里贝拉-爱他普西凹陷、卢拉西凹陷、撒格他里欧东凹陷、阿拉姆东凹陷、艾买提斯特(Ematist)西凹陷、卡拉维拉东凹陷和卢拉北凸起、沙-帕凸起、克-乌凸起、阿-撒凸起、苏-玛凸起、苏-阿凸起、安-瑞凸起。将东部坳陷划分为2个凸起和3个凹陷:布-朱(Bumerangue-Jupiter)凸起、包-提(Paul Brasil-Tita)凸起和卢-苏东凹陷、布-朱东凹陷、包-提东凹陷。

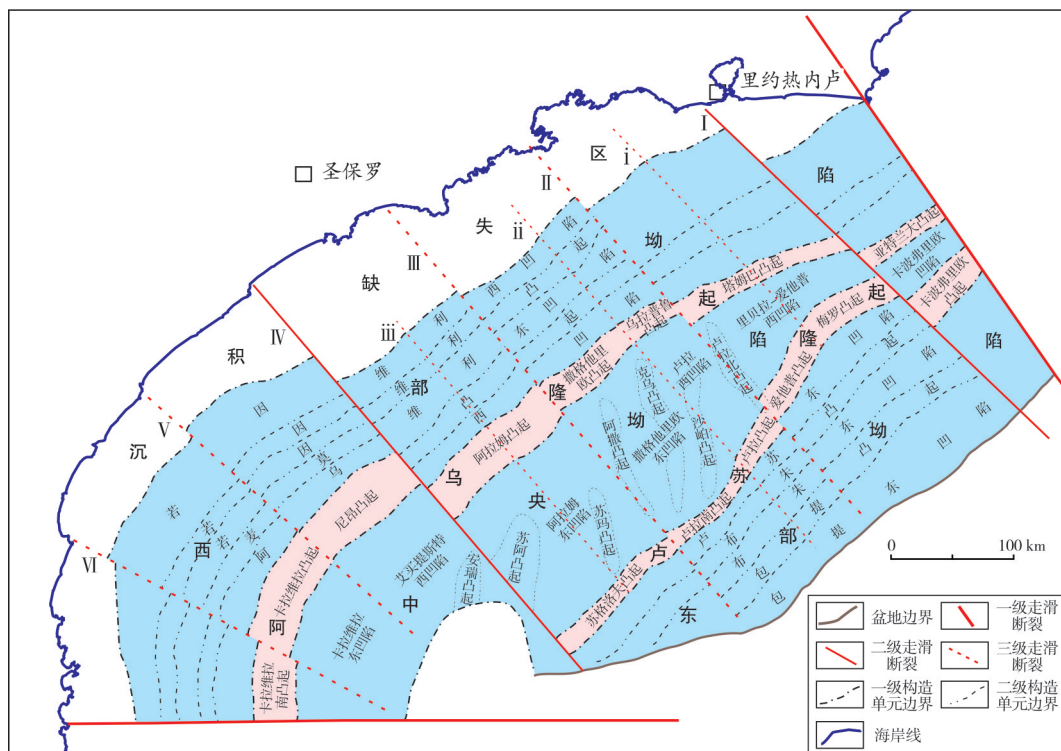


图2 桑托斯盆地盐下构造单元划分图

Fig. 2 Division of subsalt tectonic units in Santos Basin

4 桑托斯盆地构造单元划分依据

4.1 高精度布格重力图是确定盆地构造单元划分方案的基础数据

高精度布格重力图(图3)能够显示与基底隆起相关的盆地隆起、凸起及火成岩等关键信息。桑托斯盆地的形成演化始终处于以拉张应力为主的伸展过程中,裂谷盆地断陷期隆坳格局形成后的构造作用以东部整体抬升、西部整体沉降以及差异压实作用为主,这使得裂谷盆地期隆坳相对关系得以保留并进一步增强其隆坳幅度,特别是东部坳陷拉张作用造成凸起和凹陷高差比初始形成期增大1 000~2 000 m,这一特点为高精度布格重力异常准确识别

基底隆起提供了重要的前提条件。经过十余个已钻探构造圈闭的沉积特征综合研究确定,隆起和凸起为高布格重力异常区,坳陷和凹陷为低重力异常区。从重力异常图中,可以解读出7个方面的信息:①盆地边界及裂谷盆地沉积边界,以大规模连续性重力异常高为特征;②东西分带特征,以南北走向高重力异常连续发育为特征;③南北分段特征,以高重力异常东西横向错断为特征;④不同带活动强度差异(东强西弱、北强南弱),以重力异常横向变化幅度大小为特征;⑤大规模火成岩发育带,以穹窿形或线形重力异常高为特征;⑥古老洋壳,以楔形高重力异常为特征;⑦新生洋壳,以与垂直于大洋中脊的走滑断裂带相关的重力异常高为特征。

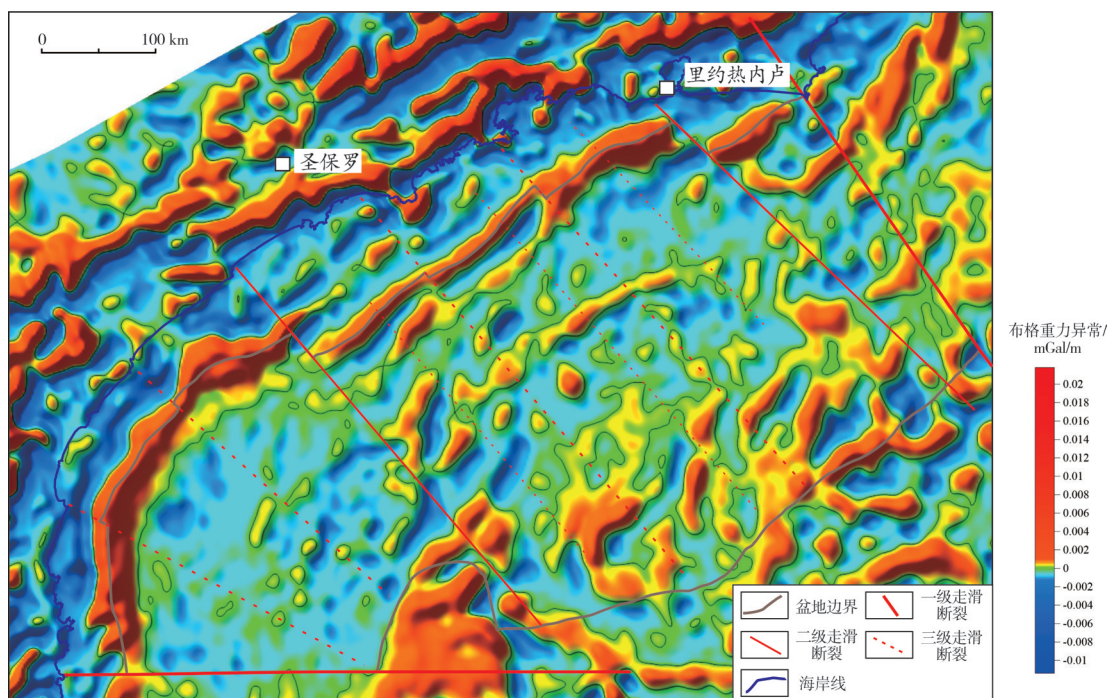


图3 桑托斯盆地高精度布格重力异常图

Fig. 3 High-precision Bouguer gravity anomaly map in Santos Basin

4.2 工业地震大剖面是确定盆地隆坳格局和构造单元划分方案的关键数据

区域地震大剖面(图4)能够清晰反映裂谷盆地断陷期和坳陷期沉积以及大陆边缘沉积特征,利用地震剖面标定可以判断布格重力异常是否真实反映裂谷盆地期构造格局,并利用地层厚度确定一级构造单元和二级构造单元边界。利用地震大剖面

标定和解释,确定中央坳陷为裂谷盆地期主湖区,坳陷宽度约为50~200 km,具有南宽北窄的特征,沉积厚度约为1 000~4 000 m;西部坳陷和东部坳陷宽度约为200 km,各分为两凸三凹,凹陷沉积宽度约30~50 km,沉积厚度约为1 000~3 000 m,凸起宽度约为10~30 km,沉积厚度约为100~800 m;卢—苏隆起和阿—乌隆起宽度约为10~40 km,卢—苏隆起北宽南窄,阿—乌隆起南宽北窄,沉积厚度约为100~800 m。

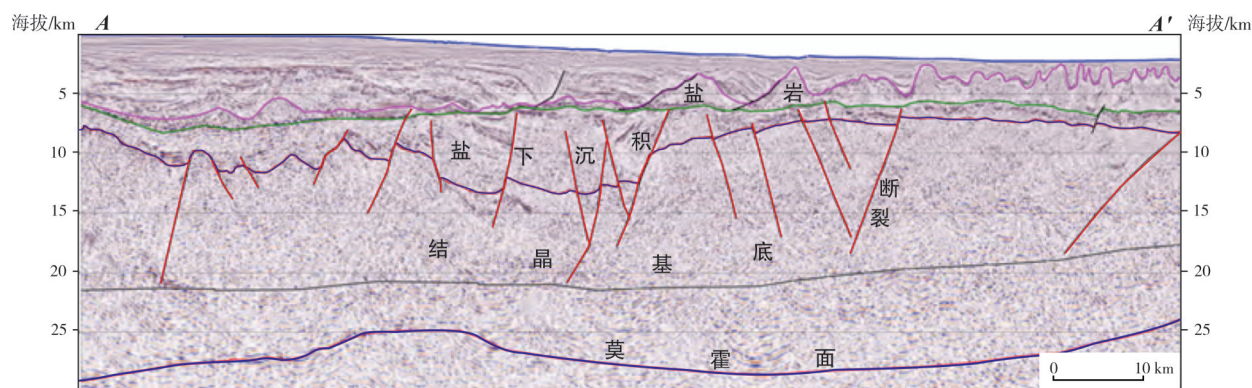


图4 桑托斯盆地地区地震剖面(剖面位置见图1, 修改自文献[16])

Fig. 4 Regional seismic profile in Santos basin (section location is shown in Fig. 1, modified from reference [16])

4.3 高精度三维地震数据是准确确定构造单元边界的主要依据

利用高精度三维地震剖面(图5)能够清晰识别隆起和凸起上湖相碳酸盐岩的沉积结构,以及拗陷和凹陷中沉积充填的超覆特征,能够准确确定断陷

期和拗陷期沉积厚度,据此可以确定二级构造单元边界。桑托斯盆地三维地震资料主要分布在盆地中部和东部,其覆盖范围内的构造单元边界较为明确,而盆地南部和西部三维地震资料较少,构造单元边界主要依据区域地震大剖面和重力资料综合确定,其可靠性略低。

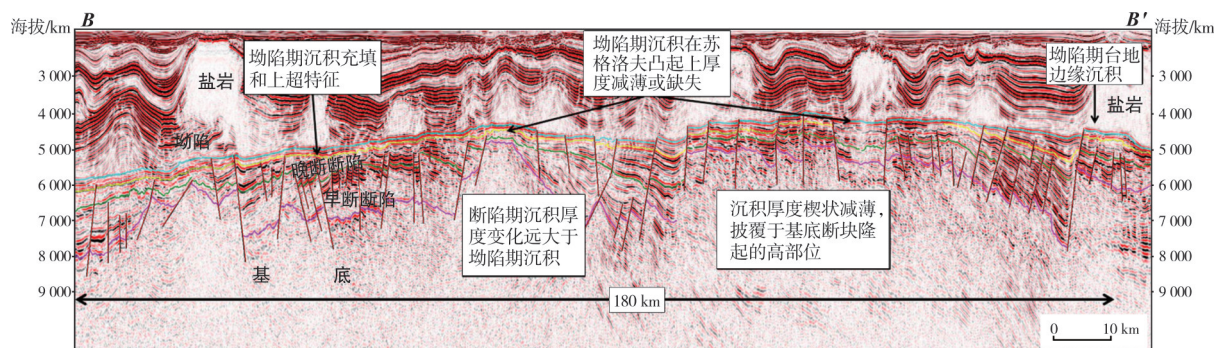


图5 桑托斯盆地高精度三维地震剖面(剖面位置见图1, 修改自文献[16])

Fig. 5 High-precision 3D seismic profile in Santos basin (section location is shown in Fig. 1, modified from reference [16])

4.4 钻井、测井和岩心数据是确定岩相古地理的重要依据

已有钻井分布在桑托斯盆地的不同构造带上,主要位于现今构造圈闭高部位,它们能够提供大量古隆起上沉积特征和构造岩相古地理的信息,特别是可用于对比不同构造单元的古地貌特征,这对于准确确定构造单元归属具有重要的参考价值。本文所采用的数据主要分布在卢-苏隆起和中央拗陷中部,部分数据分布在阿-乌隆起中部和东部拗陷,西部拗陷、阿-乌隆起南部和中央拗陷南部的钻井数据较少。

4.5 基于二维地震解释的沉积厚度图是确定构造单元边界的参考资料

利用区域二维地震资料综合解释的断陷期与

早拗陷期总沉积厚度图较清晰显示了裂谷盆地隆坳、凸凹的构造格局:中央拗陷沉积厚度最大,西部拗陷和东部拗陷次之,卢-苏隆起和阿-乌隆起最薄,中央拗陷、西部拗陷、东部拗陷多个凸起沉积厚度较薄(图6)。由于巨厚盐岩之下裂谷层序的地震资料解释存在较大的不确定性,沉积地层厚度图可以作为宏观沉积充填模式的参考,不能用于局部沉积特征的精细评价。

4.6 磁力异常图是识别盆地及隆坳边界的辅助资料

航空磁力异常图(图7)可以辅助确定盆地边界、隆坳边界,并用于识别洋陆过渡区和洋壳上的火山岩体等特殊异常体,同时对于确定走滑断裂带及伴生的火山岩等重要地质因素具有辅助作用。

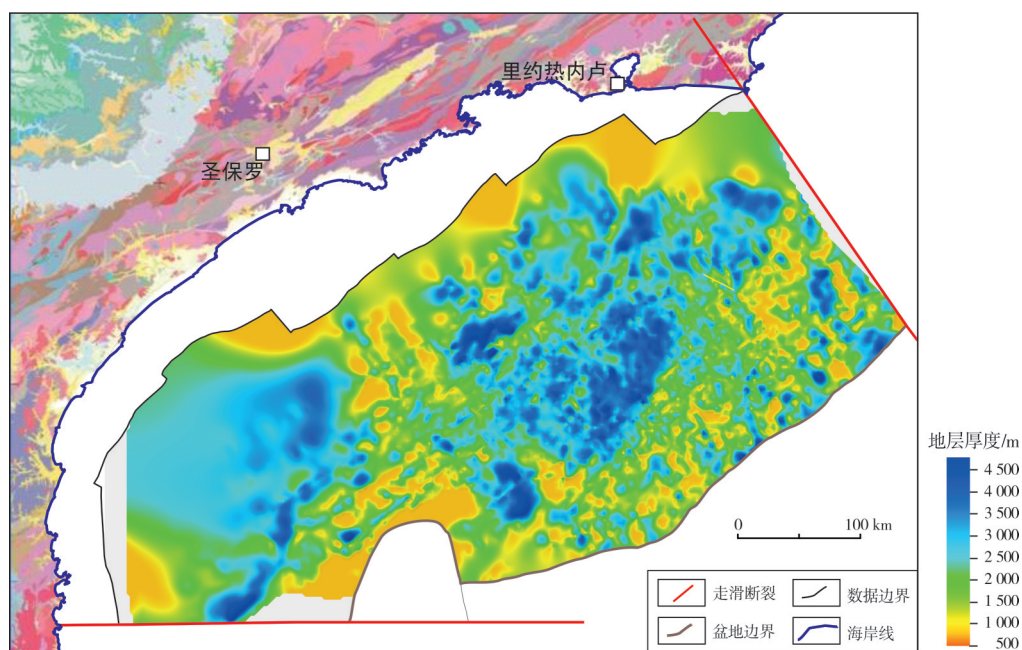


图6 桑托斯盆地盐下裂谷期沉积地层厚度图

Fig. 6 Thickness contour map of subsalt strata during rift period in Santos Basin

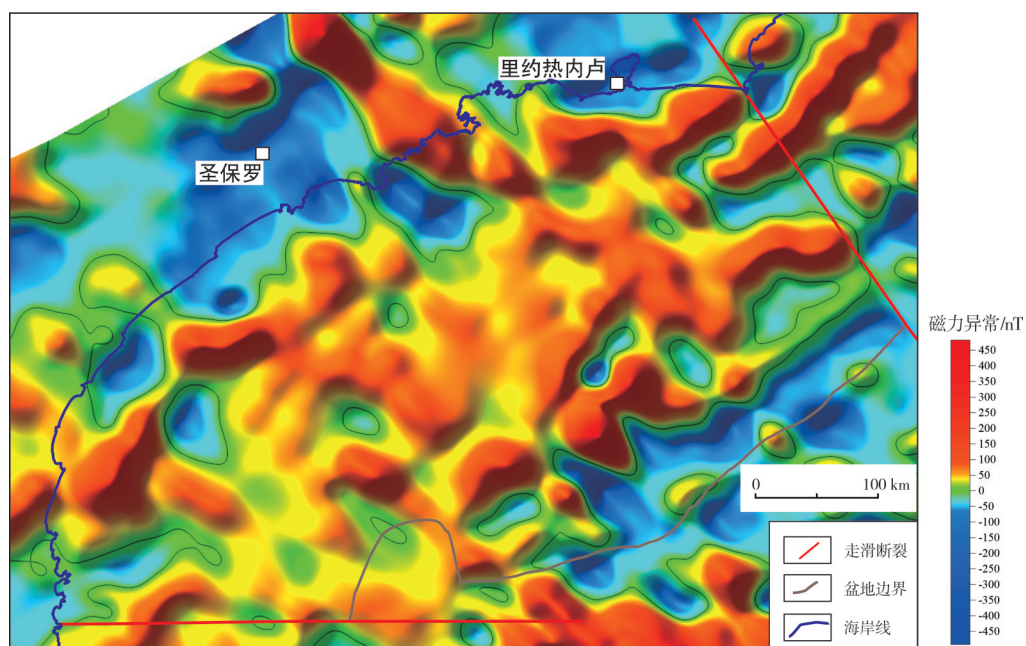


图7 桑托斯盆地磁力异常图

Fig. 7 Magnetic anomaly map in Santos Basin

4.7 区域大地构造解译图是确定构造演化控制因素的辅助信息

桑托斯盆地在形成过程中经历了5期火山作用、裂谷盆地早期的老洋壳活动、大陆边缘盆地期新洋壳活动及盆地东部地壳减薄和地幔隆升作用，其持续改造盆地构造特征，特别是盆地东部经历强

烈构造抬升与火山活动，给盆地构造单元边界的准确划分带来较大影响。因此，必须将桑托斯盆地作为大西洋西缘盆地的一部分，利用区域自由重力异常图，结合区域构造演化与深部结构解译大剖面等信息，更加准确地认识西部大陆隆起与陆缘沉降及裂谷期层序的整体沉降与差异压实，东部陆壳拉伸与新生洋壳及陆缘期的构造强烈拉张与走滑改造，

北部控盆断裂与火山岩隆及陆缘期的构造强烈走滑改造与隆升,南部控盆断裂与火山岩隆及裂谷期层序的整体沉降与走滑改造;更加准确地认识裂谷期控盆断裂再活动、差异压实沉降、构造隆起特征增强等诸多构造变形因素的多期次叠加作用。

5 结论与建议

(1) 桑托斯盆地主要生储盖组合发育在裂谷盆地期,以裂谷盆地构造演化特征为主划分盆地构造单元对于油气勘探选区和资源评价具有重要指导意义。

(2) 通过对高精度重力异常、工业地震数据、钻井地层等信息综合分析,确定了桑托斯盆地构造单元划分的原则、依据与方案。将盆地划分为5个一级构造单元:西部坳陷、阿-乌隆起、中央坳陷、卢-苏隆起和东部坳陷,并进一步划分出38个二级构造单元,将卢-苏隆起划分为6个凸起,将阿-乌隆起划分为8个凸起。

(3) 在桑托斯盆地卢-苏隆起已发现十余个巨型油田,与其隔中央坳陷相望的阿-乌隆起勘探程度略低,亦获得多个勘探突破,是未来最为有利的勘探领域。

(4) 桑托斯盆地演化经历3种类型盆地叠合复合,在大陆构造作用、大洋构造作用、地壳减薄与地幔隆升作用、火山作用等共同控制下,现今构造特征丰富多样,兼之巨厚盐岩影响地震成像质量,造成裂谷盆地期构造单元划分,特别是隆起与凸起边界的确定仍然存在较大不确定性,需要随着资料的补充和认识的深化不断完善和优化。

参考文献

- [1] 张吉光,王英武. 沉积盆地构造单元划分与命名规范化讨论[J]. 石油实验地质, 2010, 32(4): 309-313, 318.
- [2] 王步清,黄智斌,马培领,等. 塔里木盆地构造单元划分标准、依据和原则的建立[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(1): 86-93.
- [3] 李曰俊,杨海军,张光亚,等. 重新划分塔里木盆地塔北隆起的次级构造单元[J]. 岩石学报, 2012, 28(8): 2466-2478.
- [4] 贾承造,魏国齐. 塔里木盆地构造特征与含油气性[J]. 科学通报, 2002, 47(Z1): 1-8.
- [5] 马庆佑,吕海涛,蒋华山,等. 塔里木盆地台盆区构造单元划分方案[J]. 海相油气地质, 2015, 20(1): 1-9.
- [6] 温志新,童晓光,张光亚,等. 巴西被动大陆边缘盆地群大油气田形成条件[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2012, 34(5): 1-9.
- [7] 于璇,侯贵廷,代双河,等. 巴西深水盆地对比及油气成藏规律分析[J]. 海相油气地质, 2016, 21(1): 61-72.
- [8] 朱伟林,崔早云,吴培康,等. 被动大陆边缘盆地油气勘探新进展与展望[J]. 石油学报, 2017, 38(10): 1099-1109.
- [9] 王红平,于兴河,杨柳,等. 巴西桑托斯盆地油气田形成的关键条件与勘探方向[J]. 矿产普查, 2020, 11(2): 369-377.
- [10] 张忠民,朱奕璇,张德民,等. 巴西大坎波斯盆地盐下碳酸盐岩油气成藏规律与勘探启示[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(4): 75-85.
- [11] 康洪全,程涛,李明刚,等. 巴西桑托斯盆地油气成藏特征及主控因素分析[J]. 中国海上油气, 2016, 28(4): 1-8.
- [12] MEISLING K E, COBBOLD P R, MOUNT V S. Segmentation of an obliquely rifted margin, Campos and Santos basins, southeastern Brazil[J]. AAPG bulletin, 2001, 85(11): 1903 - 1924.
- [13] COBBOLD P R, MEISLING K E, MOUNT V S. Reactivation of an obliquely rifted margin, Campos and Santos basins, southeastern Brazil[J]. AAPG bulletin, 2001, 85(11): 1925 - 1944.
- [14] MOULIN M, ASLANIAN D, UNTERNEHR P. A new starting point for the South and Equatorial Atlantic Ocean[J]. Earth-science reviews, 2010, 98(1/2): 1-37.
- [15] DICKSON W, SCHIEFELBEIN C, ODEGARD M. Defining a supergiant petroleum system in Brazil's Santos Basin with multidisciplinary methods: one template for exploration success[J]. Interpretation, 2019, 7(4): 133-152.
- [16] KUMAR N, DANFORTH A, NUTTALL P, et al. From oceanic crust to exhumed mantle: a 40 year (1970 - 2010) perspective on the nature of crust under the Santos Basin, SE Brazil [J]. Geological Society, London, special publications, 2013, 369(1): 147 - 165.
- [17] MOHRIAK W U, NÓBREGA M, ODEGARD M E, et al. Geological and geophysical interpretation of the Rio Grande Rise, south-eastern Brazilian margin: extensional tectonics and rifting of continental and oceanic crusts [J]. Petroleum geoscience, 2010, 16(3): 231 - 245.
- [18] DRAGOI-STAVAR D, HALL S. Gravity modeling of the ocean-continent transition along the South Atlantic margins [J]. Journal of geophysical research(solid earth), 2009, 114 (B9): 1-15.
- [19] MODICA C J, BRUSH E R. Postrift sequence stratigraphy, paleogeography, and fill history of the deep-water Santos Basin, offshore southeast Brazil [J]. AAPG bulletin, 2004, 88 (7): 923 - 945.
- [20] FRANKE D. Rifting, lithosphere breakup and volcanism: comparison of magma-poor and volcanic rifted margins [J]. Marine and petroleum geology, 2013, 43: 63-87.
- [21] JACKSON M P A, CRAMEZ B C, FONCK J M. Role of sub-aerial volcanic rocks and mantle plumes in creation of South Atlantic margins: implications for salt tectonics and source rocks [J]. Marine and petroleum geology, 2000, 17(4): 477-498.
- [22] CONSTANTINO R R, EDER C M, DE SOUZA I A, et al. Salt structures from inversion of residual gravity anomalies: application in Santos Basin, Brazil [J]. Brazilian journal of geology, 2019, 49(1): 1-11.
- [23] CONTRERAS J, ZÜHLKE R, BOWMAN S, et al. Seismic stratigraphy and subsidence analysis of the southern Brazilian margin(Campos, Santos and Pelotas basins) [J]. Marine and petroleum geology, 2010, 27(9): 1952-1980.
- [24] GARCIA S F D M, LETOUZEY J, RUDKIEWICZ J L. Structural modeling based on sequential restoration of gravitational salt deformation in the Santos Basin(Brazil) [J]. Marine and petroleum geology, 2012, 35(1): 337-353.

- [25] BUCKLEY J P, BOSENCE D, ELDERS C. Tectonic setting and stratigraphic architecture of an Early Cretaceous lacustrine carbonate platform, Sugar Loaf High, Santos Basin, Brazil [J]. Geological Society, London, special publications, 2015, 418(1): 175.
- [26] RESTON T J. The opening of the central segment of the South Atlantic: symmetry and the extension discrepancy [J]. Petroleum geoscience, 2010, 16(3): 199–206.
- [27] 宋一帆. 巴西坎波斯盆地层序地层研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- [28] 熊利平, 邬长武, 郭永强, 等. 巴西海上坎波斯与桑托斯盆地油气成藏特征对比研究[J]. 石油实验地质, 2013, 35(4): 419–425.
- [29] 陶崇智, 邓超, 白国平, 等. 巴西坎波斯盆地和桑托斯盆地油气分布差异及主控因素[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(6): 1753–1761.
- [30] 梁英波, 张光亚, 刘祚冬, 等. 巴西坎波斯—桑托斯盆地油气差异富集规律[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(12): 55–62.
- [31] 王朝锋, 王红平, 邵大力, 等. 巴西桑托斯盆地S油田火成岩地震预测[J]. 物探化探计算技术, 2018, 40(5): 573–578.
- [32] 王朝锋, 王红平, 杨柳, 等. 巴西桑托斯盆地S油田盐下碳酸盐岩地层古地貌恢复技术及应用[J]. 物探化探计算技术, 2020, 42(5): 629–635.
- [33] 汪新伟, 邬长武, 郭永强, 等. 巴西桑托斯盆地卢拉油田成藏特征及对盐下勘探的启示[J]. 中国石油勘探, 2013, 18(3): 61–69.
- [34] 程涛, 康洪全, 梁建设, 等. 巴西桑托斯盆地岩浆岩成因类型划分与活动期次分析[J]. 中国海上油气, 2019, 31(4): 55–66.
- [35] 邬长武. 巴西桑托斯盆地盐下层序油气地质特征与有利区预测[J]. 石油实验地质, 2015, 37(1): 53–56, 63.
- [36] 康洪全, 吕杰, 程涛, 等. 巴西桑托斯盆地盐下湖相碳酸盐岩储层特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(4): 170–178.
- [37] 马中振. 典型大西洋型深水盆地油气地质特征及勘探潜力: 以巴西桑托斯盆地为例[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(3): 1108–1115.
- [38] 郭栋. 坎波斯盆地盐下含油气系统分析与资源评价[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016.
- [39] 杨永才, 孙玉梅, 李友川, 等. 南大西洋被动陆缘共轭盆地烃源岩分布与油气富集规律——以巴西桑托斯盆地和西非纳米贝盆地为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(2): 157–167.
- [40] 陶崇智, 殷进垠, 刘君兰, 等. 南大西洋被动陆缘含盐盆地油气分布特征[J]. 地质论评, 2015, 61(增刊1): 168–169.
- [41] 余一欣, 陶崇智, 史帅雨, 等. 南大西洋中段盆地盐构造发育特征及其影响因素模拟[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 118–126.
- [42] 马中振, 谢寅符, 刘亚明, 等. 南美东缘被动陆缘盆地石油地质特征与资源潜力评价[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(4): 1366–1374.
- [43] 蒋春雷, 王春修, 崔早云. 桑托斯盆地盐下成藏条件与成藏规律研究[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(6): 346–350, 539.
- [44] 李明刚. 桑托斯盆地盐下裂谷系构造特征及圈闭发育模式[J]. 断块油气田, 2017, 24(5): 608–612.

编辑:董庸

Discussion on the division of subsalt tectonic units of Santos Basin, offshore Brazil

SHI Buqing, FAN Guozhang, SHAO Dali, WANG Hongping, ZHAO Junfeng, LIU Yaming,

ZUO Guoping, WANG Chaofeng, YANG Liu, MA Hongxia, DING Liangbo

Abstract: Santos Basin has experienced three evolution stages: Early Cretaceous craton depression basin, early and middle Early Cretaceous rift basin and late Early Cretaceous Albian–Holocene continental margin basin. Oil resources are mainly enriched in the source–reservoir–cap assemblage of rift basin. The current division scheme of basin tectonic units can not accurately reflect the tectonic framework of rift period. According to the latest basic data of gravity and magnetism, seism, drilling and ocean drilling, a new scheme for the division of subsalt tectonic units in Santos basin is put forward: (1) Taking the main faults and sedimentary characteristics in the late fault depression period as the basis for the division of primary tectonic units, the boundary between uplift and depression is determined according to the faults distribution and the isoline of sedimentary thickness of 600 m in the late fault depression period. (2) Taking the secondary faults and sedimentary characteristics in the late fault depression stage as the basis for dividing the secondary tectonic units, the boundaries of bulges and sags are determined according to the distribution of synsedimentary tension faults, secondary strike slip faults and their regulating faults, combined with the 1000 m isoline of sedimentary thickness in the late fault depression stage and early depression stage. (3) The basin is divided into five primary structural units of "two uplifts and three depressions", including western depression, Aram–U uplift, central depression, Lula–Sugar uplift and eastern depression, and further divided into 38 secondary structural units. The tectonic units division based on the evolution characteristics of rift basins are of great significance for future oil and gas exploration and resource evaluation.

Key words: Tectonic unit division; Subsalt; Rift basin; Santos Basin; Brazil

SHI Buqing, First author: Doctor, Professoriate senior engineer, mainly engaged in research on overseas oil and gas exploration and development. Add: No. 6–1 Fuchengmen North Street, Xicheng District, Beijing 100034, China

FAN Guozhang, Corresponding author: PhD, Senior Engineer, mainly engaged in deep–water oil and gas exploration and geological research. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China.