

李明刚. 反转构造特征及其在巴西桑托斯盆地油气勘探中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(9): 71-77.

LI Minggang. Inversion structure and its application in petroleum exploration in Santos Basin, Brazil[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(9): 71-77.

反转构造特征及其在巴西桑托斯盆地 油气勘探中的应用

李明刚

(中国海洋石油国际有限公司, 北京 100027)

摘要:为了揭示反转构造的成藏特征,系统总结了反转构造的类型特征、构造样式及形成机制,并对桑托斯盆地的勘探实例开展了分析。研究表明,正反转构造是一种重要的含油气圈闭,其发育演化与所受的挤压应力强度相关,在轻微、中等反转阶段,主要发育挠曲褶皱反转构造,在强烈和全部反转阶段,主要表现为断层强烈逆冲反转,发育断层相关型构造;反转构造是区域构造事件的响应,热体制变化和区域构造体制变化是2种主要的构造反转动力机制。正反转构造具有近源供烃,断裂-裂缝等运移通道发育以及圈闭可靠、规模大等特征,油气“生-汇-聚”时空匹配关系良好,是一种重要的油气藏类型。

关键词:桑托斯盆地; 油气藏; 构造样式; 动力机制; 反转构造

中图分类号:P736; P744.4

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2021.157

0 引言

构造反转(inversion)的概念在地质学中应用较早,自从GLENNIE和BOEGNER应用“构造反转”表述原来沉降的区域后来发生隆升这一构造运动极性倒转的地质现象,构造反转及其作用形成的反转构造逐渐引起大量学者的关注^[1-6],BALLY^[2]认为盆地反转是正断层控制的盆地、半地堑和地堑系统后来受到挤压发生隆起;MITRA^[3]认为正反转构造是由于先存伸展构造受到后期挤压作用造成的;漆家福等^[6]在吸收前人认识的基础上,总结反转构造是构造运动(或位移)极性倒转过程中形成的各种叠加构造变形。反转构造前后2次构造变形的位移矢量应该在一个统一平面内,且位移极性是倒转的,并不是简单的构造叠加。2次构造运动或位移性质相同(伸展、收缩、走滑等),而方向不同的构

造变形的叠加或虽然运动、位移极性相反,但是位移矢量不在同一应变平面内的构造变形叠加都不是反转构造。

反转构造不仅能够通过野外露头观察,也能用砂箱物理模拟实验恢复再现。不同学者早期主要是通过野外露头和物理模拟手段对反转构造的类型、构造样式及演化过程等开展研究^[7]。21世纪以来,随着各种地质评价技术的应用,特别是3D地震技术的普及,地质学者对构造反转引起的各种反转构造的地质认识不断深入,逐渐完善了其几何学、运动学和动力学的内涵,并探讨了盆地内反转构造相关的含油气圈闭的油气成藏特征^[8-13],推动了这种类型油气藏的发现。

1 反转构造的类型及特征

三维空间内,构造反转表现为统一的平面内前后两期构造变形的叠加。依据构造边界或构造要素的主要位移分量差异,反转构造类型多样^[6],如水平伸展构造变形基础上叠加水平收缩构造变形为伸展构造反转,反之为收缩构造反转;构造沉降基础上叠加构造隆起变形为沉降构造反转,反之为隆

收稿日期: 2021-06-02

资助项目: 国家科技重大专项“西非-南美海域重点区油气地质评价及关键技术研究”(2017ZX05032-001)

作者简介: 李明刚(1979—),男,博士,高级工程师,主要从事海洋油气地质方面的研究工作。E-mail: liming3@cnooc.com.cn

起构造反转;左旋走滑构造变形基础上叠加右旋走滑构造变形为左旋走滑构造反转,反之为右旋走滑构造的反转。而无论何种类型的反转构造,在剖面上都表现为构造演化过程中局部升降的反向运动结果,所以按照相对位移关系总体可以划分为正反转构造和负反转构造2大类。然而,反转构造具体的构造特征受其所处的动力学背景控制,不同区域会有不同的几何学特征。

1.1 负反转构造特征

负反转构造是指逆断层控制的挤压隆升系统后期受到拉张作用发生伸展沉降的构造变形(图1)。在负反转构造的发育过程中,后期的构造沉降多是利用先存逆冲断层面发生正断层位移,控制裂陷期层序(图1b黄色地层),导致原来逆断层上盘的剥蚀层面上部形成了比下盘厚的沉积层,而且有向上变细的正向序列,先存逆冲断层在反转过程中具有正断层位移或“上正下逆”的特征,同时由于先存逆冲断层上部较缓,反转期间断层活动不能迁就逆冲断层面而在其上盘形成新的正断层。负反转构造由于早期多处于隆升剥蚀状态,地层记录的反转信息少,或后期深埋于沉降中心,地质认识程度低,一般都作为断陷系统考虑。因此,常见的反转构造主要指的是正反转构造。

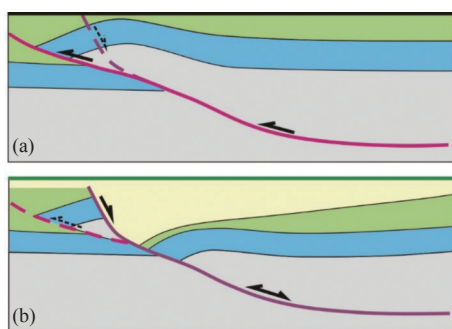


图1 负反转构造发育模式

(a)早期挤压隆升阶段;(b)晚期伸展沉降阶段

Fig.1 Development mode of negative inversion structure

1.2 正反转构造特征

正反转构造是指正断层系统控制的地堑、半地堑构造后期受到挤压作用后发生褶皱和逆冲构造变形,即原来沉降的盆地后来叠加向上位移发生隆升。具体的正反转构造类型多样,按照构造反转的强度,总体可以划分为断层相关型和挠曲褶皱型2类(图2)。挠曲褶皱型正反转构造的变形强度低,

仅表现为伸展地堑内地层发生挠曲褶皱,而早期的正断层系统在反转期不活动也没有形成新的逆冲断层。断层相关型正反转构造是早期伸展地堑系统在反转期受强烈挤压作用发生的逆冲褶皱变形。在挤压作用下,早期地堑系统一般沿边界断层反转发生逆冲褶皱,同时由于控制地堑正断层上部倾角较陡,反转期间逆冲断层活动不能迁就其断面,会在正断层下盘形成新的低缓逆冲断层,而强烈的挤压反转变形也能在半地堑内部形成大量逆冲断层。上述在盆地边缘或内部的构造反转过程中具有逆冲断层位移的早期正断层为“正反转断层”或“反转正断层”,这类断层在逆冲位移的过程中控制其上盘地层系统发生挤压褶皱,且断层下部上盘往往会保留比下盘厚的反转前的沉积层,形成不和谐的构造沉积关系,局部也可能会因剥蚀而不再保留反转前的较厚沉积,而反转后发育的新地层具有向上变粗的正常沉积。

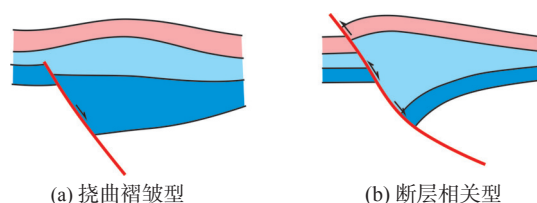


图2 正反转构造类型及特征

Fig.2 Types and characteristics of positive inversion structures

2 正反转构造样式及其形成机制

2.1 正反转构造样式

正反转构造样式受控于反转期的挤压作用,由于不同的大地构造环境存在独特的应力背景,导致正反转构造表现出不同的构造样式,如简单断展型、穿透断展型、简单断弯型、缩截断弯型及简单褶皱型等^[14]。

正反转构造的发育及演化与所受的挤压应力强度相关,在不同强度挤压应力作用下正反转构造一般表现为轻微、中等、强烈和全部反转等几个不同反转级别。由于地层在挤压应力作用下,一般先表现地层挠曲,随着应力的增加,地层挠曲不能调节应力作用而发生破裂,形成断层。因此,不同的反转程度阶段,反转构造表现出的样式存在差异。在轻微、中等阶段,反转构造表现为地层抬升的褶皱构造,可能伴有少量正断层发育,主要发育挠曲

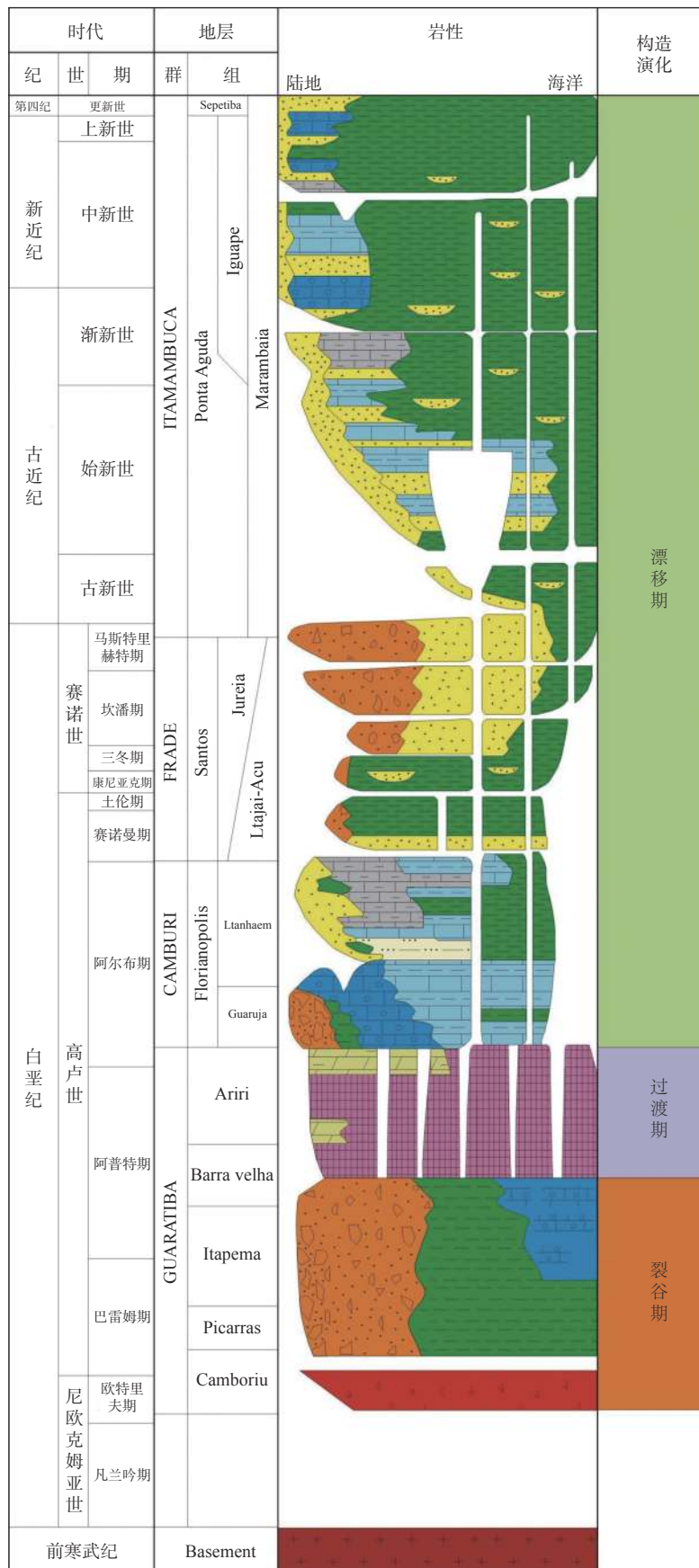


图4 桑托斯盆地综合柱状图

Fig.4 Comprehensive histogram of the Santos Basin, Brazil

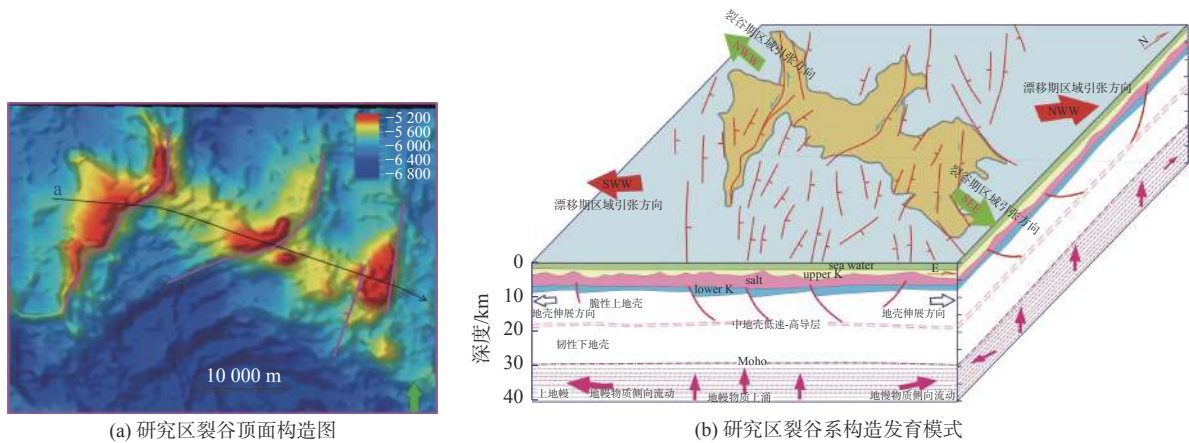
沿着走滑断层带发生局部构造反转, 反转构造一般分布在走滑断层弯曲部位或多条走滑断层叠复区域, 受控于断层走滑位移受阻形成的局部挤压应力场。

3.2 桑托斯盆地反转构造样式

桑托斯盆地的反转构造仅沿着走滑断裂局部发育, 并不是全盆地存在, 是断层走滑作用的结果。在桑托斯盆地, 断层走滑作用形成的局部挤压应力强度不大, 仅引起地层抬升挠曲, 发生轻微—中等程度反转。当地层挠曲不能调节应力作用的时候发生破裂, 形成正断层, 并不能形成逆冲断层, 因此上下盘无断距的零点位于伸展层系的顶部, 反转率 R_1 为零, 未发生缩短反转。所以盆地内反转构造主要发育挠曲褶皱构造样式并伴有少量正断层发育。

如盆地北部研究区在裂谷顶面构造图上显示发育一个大型背斜构造, 具有 3 个构造高点(图 5a),

各局部构造受继承性活动的具有走滑位移的正断层控制而发生构造反转。其中西部和中部构造处于左旋走滑断层的弯曲部位因位移受阻而发生构造反转, 而东部构造是处于 2 条左旋走滑断层的重叠部位因叠覆增压而形成的反转构造(图 5b)。构造演化分析表明研究区中部构造发生的构造反转最为典型, 具有“古洼今突”的构造特征(图 6)。早期盐下 Picarras 到 Barra Velha 组裂谷沉积期, 中部构造对应构造低的深洼, 具有不对称地堑结构, 而在晚期漂移阶段因断层的走滑作用(花状构造发育)发生挤压反转抬升, 从而形成了现今的洼中突起型挠曲褶皱构造。区块内东部和西部构造在早期断陷阶段具有地垒和半地垒结构, 构造背景高, 使得这 2 个区域的构造反转不如中部构造明显, 漂移期的构造反转仅是使得这 2 个区域发生进一步的抬升, 形成了现今叠加改造的断块或断背斜构造。



(a) 研究区裂谷顶面构造图

(b) 研究区裂谷系构造发育模式

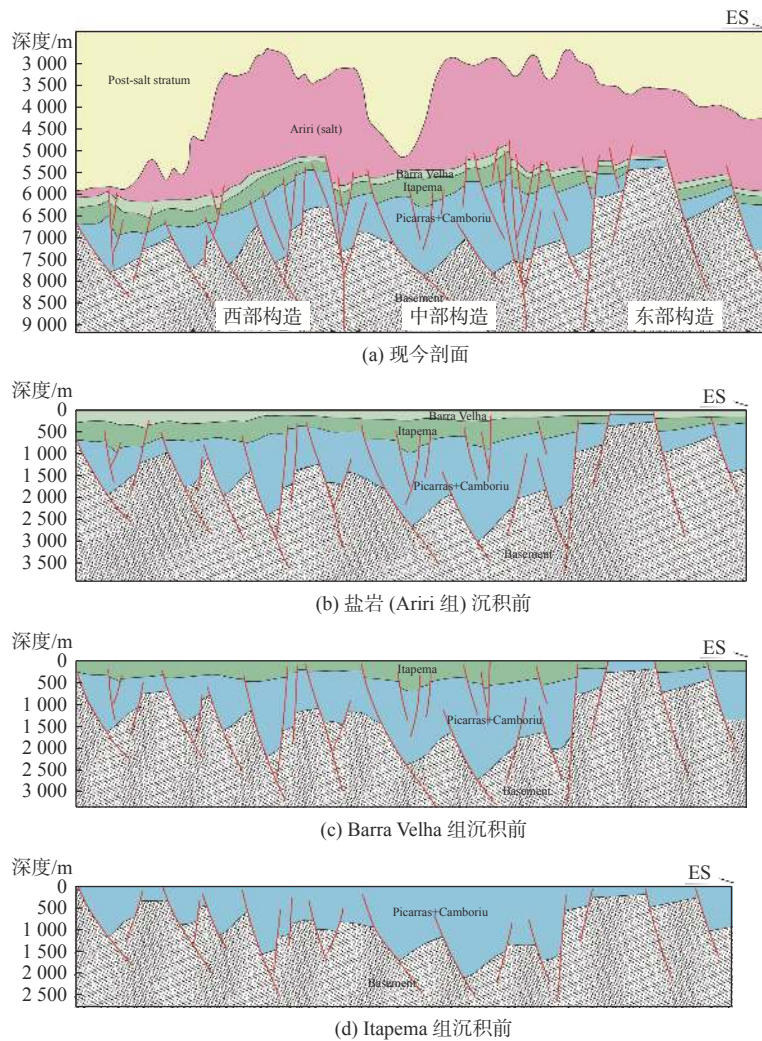
图 5 研究区裂谷顶面构造特征及其形成机制

Fig.5 Structural characteristics and formation mechanism of the rift top in the study area

3.3 桑托斯盆地构造反转对油气成藏的影响

局部的构造反转对区块内背斜构造的油气成藏条件具有明显的影响。构造反转改变了背斜圈闭的形态和规模。盐岩沉积前的裂谷期, 区块内背斜构造发育区表现为“一洼隔两突”结构, 发育东西 2 个 NE—SW 走向的孤立构造, 漂移期构造反转使中部洼陷区反转为构造高, 将东西 2 个高点连为一体, 进而形成了 1 个统一的 NW—SE 走向大型背斜构造(图 6), 圈闭的规模也随之扩大。构造反转改变了裂谷期的结构, 进而影响了储层、烃源岩的赋存形态。区域研究表明, 裂谷晚期 Itapema-Barra Velha 组发育的生物灰岩储层主要在桑托斯盆地远

岸基底高的区域广泛发育。本次论述区块离岸较远, 且区块内背斜构造的东西 2 个高点继承性发育, 利于生物灰岩储层发育, 而中部高点是在晚期漂移阶段反转形成的“洼中突起”, 在裂谷储层发育期是构造低的地堑, 灰岩储层发育质量可能会受到影响。同时正因为中高点在裂谷期是一个构造低的不对称地堑, 非常利于湖相烃源岩的发育, 使得该反转构造直接披覆在烃源岩之上, 具有近源供烃的优势。此外, 构造反转为油气充注提供了有利的运移通道。反转挤压应力不仅能够形成大量新生断裂还能使一些基底断裂活化, 例如区块内控制大型背斜 3 个构造高点断裂都是继承性活动的基底油源断层, 这些断层为油气的运移提供了良好的通道。因此



位置见图 5a

图 6 桑托斯盆地研究区构造演化

Fig.6 Tectonic evolution of the Santos Basin area

该反转背斜构造具有良好的油气“生-汇-聚”时空匹配关系,油气成藏条件比较优越,目前勘探实践也已经证实该构造是一个大型的油气发现。

4 结论

(1)反转构造是统一的平面内在构造运动(或位移)极性倒转过程中形成的各种叠加构造变形,按照相对升降位移关系总体可以划分为正反转构造和负反转构造 2 大类,其中正反转构造是较常见类型。

(2)正反转构造的发育与所受的挤压应力强度相关,在轻微、中等反转阶段,主要发育挠曲褶皱构造,表现为地层褶皱抬升,可能伴有少量正断层发育;在强烈和全部反转阶段,主要表现为断层强烈

逆冲反转,发育断层相关型构造。

(3)反转构造不是长期地质构造演化的结果,而是受短期区域动力学背景改变的控制,是区域构造事件的响应,其中热体制变化和区域构造体制变化是 2 种主要的构造反转动力机制。

(4)反转构造的油气“生-汇-聚”时空匹配关系良好,具有近源供烃,断裂-裂缝等运移通道发育以及圈闭可靠、规模大等特征,油气成藏条件优越,是一类重要的含油气圈闭。

参考文献:

- [1] GLENNIE K W, BOEGNER P L E. Sole pit inversion tectonics[C]//Petroleum Geology of the Continental Shelf of North-West Europe. London: Institute of Petroleum, 1981: 110-120.
- [2] BALLY A W. Tectogenese at seismic reflexion[J]. Bulletin Society. Geologique de France, 1984, 7(2): 279-285.

- [3] MITRA S. Geometry and kinematic evolution of inversion structures[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(7): 1159-1191.
- [4] WILLIAMS G D, POWELL C M, COOPER M A. Geometry and kinematics of inversion tectonics[J]. London: Geological Society, Special Publications, 1989, 44(1): 3-15.
- [5] ULIANA M A, ARTEAGA M E, LEGARRETA L, et al. Inversion structures and hydrocarbon occurrence in Argentina[J]. London: Geological Society, Special Publications, 1995, 88(1): 211-233.
- [6] 漆家福, 夏义平, 杨桥. 油区构造解析[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
- [7] MCCLAY K R. Glossary of thrust terms [M]/MCCLAY K R. Thrust Tectonic. London: The Geological Society. 1991: 419-433.
- [8] TURNER J P, WILLIAMS G A. Sedimentary basin inversion and intra-plate shortening[J]. Earth-Science Reviews, 2004, 65(3): 277-304.
- [9] COOPER M, WARREN M J. The geometric characteristics, genesis and petroleum significance of inversion structures[J]. Geological Society, London: Special Publications, 2010, 335: 827-846.
- [10] 姜华, 王华, 肖军, 等. 珠江口盆地珠三坳陷构造反转与油气聚集[J]. 石油学报, 2008, 29(3): 372-377.
- [11] 唐大卿, 陈红汉, 江涛, 等. 伊通盆地新近纪差异构造反转与油气成藏[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(6): 682-691.
- [12] 张宙, 赵洪, 罗仁春, 等. 东海盆地西湖凹陷中央反转构造带花港组盖层特征[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(10): 50-56.
- [13] 郭真, 刘池洋, 田建锋. 东海盆地西湖凹陷反转构造特征及其形成的动力环境[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 59-67.
- [14] 陈昭年, 陈发景. 反转构造与油气圈闭[J]. 地学前缘, 1995, 2(3/4): 96-102.
- [15] 强昆生, 吕修祥, 周心怀, 等. 渤海辽东湾坳陷JX1-1 反转构造与油气成藏史[J]. 矿物岩石, 2012, 32(4): 31-40.
- [16] 陈哲龙, 柳广弟, 卢学军, 等. 二连盆地反转构造反转程度定量研究及对油气成藏的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(11): 4136-4145.
- [17] 陈树光, 张以明, 崔永谦, 等. 二连盆地巴音都兰凹陷反转构造及成因机制[J]. 地球科学, 2017, 42(4): 559-569.
- [18] 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.

Inversion structure and its application in petroleum exploration in Santos Basin, Brazil

LI Minggang

(CNOOC International Co., Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: To reveal the hydrocarbon accumulation characteristics of inversion structures, the types, styles, and formation mechanism of inversion structures are summarized, and exploration examples of the Santos Basin, Brazil, were analyzed. Results show that positive-inversion structures are important hydrocarbon-bearing traps. Their development and evolution are related to compressive stress intensity. In slight or intermediate inversion stage, they mainly develop flexural fold inversion structures. In strong or full inversion stages, they mainly show strong thrusting and develop fault-related inversion structures. Inversion structures are the response of regional tectonic events. Thermal regime change and regional tectonic regime change are two main tectonic counter-rotational force mechanisms. Positive inversion structures are characterized by near-source hydrocarbon supply, development of migration channels such as faults and fractures, and reliable and large-scale traps. In addition, positive inversion structures provide a good condition in which hydrocarbon generation, migration, and accumulation are well-matched in space and time, forming an important reservoir type.

Key words: Santos Basin; hydrocarbon accumulation; structural style; dynamic mechanism; inversion structure