



波斯湾南部Fars地区中二叠世至早三叠世层序地层特征与沉积演化

宿宇驰, 鲍志东, 张辛雨, 薛军, 班舒悦, 夏昌盛, 李宗峰, 李依霖, 宋逸婷, 吕对林

引用本文:

宿宇驰, 鲍志东, 张辛雨, 等. 波斯湾南部Fars地区中二叠世至早三叠世层序地层特征与沉积演化[J]. 沉积学报, 2026, 44(1): 166-181.

SU YuChi, BAO ZhiDong, ZHANG XinYu, et al. Sequence Stratigraphy and Sedimentary Evolution of Middle Permian to Early Triassic in Fars Region, Southern Persian Gulf[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2026, 44(1): 166-181.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

文昌B凹陷北坡珠海组潮汐沉积特征及演化

Tidal Sedimentary Characteristics and Evolution of the Zhuhai Formation, Northern Slope of the Wenchang B Sag

沉积学报. 2020, 38(6): 1313-1326 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2020.007>

辽宁兴城地区前寒武纪地层序列和不整合

The Precambrian Stratigraphic Sequence and Unconformities in Xingcheng Area of Liaoning Province, China, with Discussion of the Sedimentary paleogeographic Evolution of the Southeastern Yanshan Taphrogenic Trough Basin

沉积学报. 2020, 38(4): 687-711 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2020.004>

闽北近岸海域晚更新世以来沉积地层特征及其演化

Sedimentary Stratigraphic Characteristics and Evolution since the Late Pleistocene in the Offshore Area of Northern Fujian

沉积学报. 2020, 38(2): 331-339 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.095>

庙西南凸起馆陶组浅水辫状河三角洲沉积特征及砂体演化

Sedimentary Characteristics and Sand Body Evolution of Shallow Braided River Delta of Guantao Formation in Miaoxi'nan Uplift, Bohai Sea Area

沉积学报. 2018, 36(4): 807-817 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.047>

华北中南部博山地区上古生界沉积相与沉积演化特征

Sedimentary Facies and Their Evolution Characteristics of Upper Paleozoic in Zibo Boshan Area, Central and Southern Region of North China

沉积学报. 2018, 36(4): 731-742 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.052>

引用格式:宿宇驰,鲍志东,张辛雨,等.2026.波斯湾南部Fars地区中二叠世至早三叠世层序地层特征与沉积演化[J].沉积学报,44(1):166-181.

SU YuChi, BAO ZhiDong, ZHANG XinYu, et al. 2026. Sequence Stratigraphy and Sedimentary Evolution of Middle Permian to Early Triassic in Fars Region, Southern Persian Gulf[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(1): 166-181.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2024.010

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2024.010

波斯湾南部 Fars 地区中二叠世至早三叠世层序地层特征与沉积演化

宿宇驰^{1,2}, 鲍志东^{1,2}, 张辛雨^{1,2}, 薛军^{1,2}, 班舒悦^{1,2}, 夏昌盛^{1,2}, 李宗峰^{1,2},
李依霖^{1,2}, 宋逸婷^{1,2}, 吕对林^{1,2}

1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

摘要 【目的】波斯湾南部 Fars 地区中二叠统至下三叠统蕴含巨量的油气资源, 目前的研究缺乏对该层系层序地层与沉积演化方面的宏观认识。【方法】以该地区中上二叠统 Dalan 组和下三叠统 Kangan 组为研究对象, 基于单井和连井、岩心、薄片、测井等资料, 结合区域地质背景和前人认识, 对研究区中二叠统至下三叠统进行层序地层划分, 深入分析了各层序可容空间变化与沉积演化过程。【结果】研究区 Dalan 组与 Kangan 组共识别出 6 个层序界面和 5 个最大海泛面, 根据层序界面类型和最大海泛面的发育位置, 将其划分为 5 个三级层序; 目的层系为碳酸盐岩缓坡沉积环境, 可划分为内缓坡、中缓坡和外缓坡 3 种沉积亚相, 内缓坡可细分为潮上带萨布哈、潮间坪、潟湖、滩后、滩中和滩前共 6 种沉积微相; 研究区目的层系沉积期为干旱炎热的浅水碳酸盐岩沉积环境, 受控于可容空间与沉积物堆积速率的相对变化, SQ1~SQ2 沉积期主要发育前积型沉积模式, SQ3 沉积期发育退积与加积型沉积模式, SQ4 沉积期发育前积型沉积模式, SQ5 沉积期发育退积型沉积模式。【结论】通过对层序地层特征与沉积体系的分析, 结合全球海平面与新特提斯洋的演化过程, 认为构造所控制的相对变化是区域沉积演化的主控因素。

关键词 层序地层; 沉积演化; Dalan 组; Kangan 组; 中二叠世至早三叠世; 波斯湾南部 Fars 地区

第一作者 宿宇驰, 男, 1994 年出生, 博士研究生, 碳酸盐沉积学, E-mail: 1219133033@qq.com

通信作者 鲍志东, 男, 教授, 沉积学与储层地质学, E-mail: baozhd@cup.edu.cn

中图分类号: P512.2 **文献标志码**: A **文章编号**: 1000-0550(2026)01-0166-16

0 引言

波斯湾南部 Fars 地区中二叠统至下三叠统 Dalan 组与 Kangan 组蕴含巨量的油气, 发现了众多超级气田(白国平, 2006; 王大鹏等, 2016)。该地区最早的钻探工作开始于 20 世纪 60 年代, 先后发现了 North Field、Kangan 和 Dalan 等超级气田, 近十年内, 新发现 Khartang 1、Charak 1 和 Sepand 1 等共 5 个大气田。截至目前, 已发现总可开采 2P 储量为 5×10^{11} 桶油当量, 展现出巨大的勘探潜力。然而, 勘探与开发结果表明, Dalan 组与 Kangan 组储层非均质性强、有利相带展布规律认识不清、不同油气田产量差异较大, 这些因素制约着后续的勘探与开发工作。

碳酸盐岩储层的质量、分布和内部结构受到沉积相的空间分布、成岩过程和层序地层中的发育位置共同控制。厘清有利储层成因及其控制因素需要详细的沉积相分析和成岩过程研究。层序地层学为地层对比、纵向和横向上的相变化以及储层的相关变化提供了一个可预测的成因格架。深入开展沉积相演化与层序地层学研究, 对于圈定有利储层发育区带和指导油气勘探具有至关重要的意义。围绕 Fars 地区中二叠至下三叠统 Dalan 组和 Kangan 组的层序地层、沉积与储层等主题, 已开展了大量的研究, 虽然已建立了波斯湾地区的超层序界级别的格架(Geert *et al.*, 2001; Sharland *et al.*, 2001; Haq and Al-Qahtani, 2005), 但对于局部油

收稿日期: 2023-09-04; 修回日期: 2024-01-17; 录用日期: 2024-10-09; 网络出版日期: 2024-10-09

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0603104, 2018YFC0604304)

田的Dalan和Kangan组内的三级及更精细的层序地层划分目前仍存在不同的划分方案(Insalaco *et al.*, 2006; Abdolmaleki *et al.*, 2016; Nosrati *et al.*, 2019; Kakemem *et al.*, 2021, 2023)。研究区目的层段被认为是缓坡相沉积模式,浅滩至中缓坡等相对高能相带是优质储层的发育环境,主要的储层建造作用则包括相对海平面升降所引起的白云化、大气降水溶蚀作用等沉积后作用(Moradpour *et al.*, 2008; Rahimpour-Bonab *et al.*, 2009; Peyravi *et al.*, 2010; Esrafil-Dizaji and Rahimpour-Bonab, 2013; Enayati-Bidgoli and Navidtalab, 2020; Amel *et al.*, 2015; Abdolmaleki *et al.*, 2016; Jafarian *et al.*, 2017; Tavakoli and Jamalian, 2018),但对于碳酸盐缓坡的演化过程与沉积物堆积模式缺乏关键认识,且目前的研究多集中于局部单个或少数油气田(例如South Pars超级气田)、特定层段,缺乏对Dalan组和Kangan组的整体性、区域性研究,尤其在统一的区域层序地层格架上所构建的整体沉积演化过程认识上存在不足。

针对以上问题,基于岩心、薄片、测井等资料,综合区域地质背景与前人认识,本文对研究区中二叠统至下三叠统Dalan组和Kangan组进行层序地层划分,建立统一的层序地层格架,深入分析各层序沉积体系特征及其演化过程,并建立相应的沉积模式,以期为下一步区块优选与勘探开发提供支持。

1 区域地质概况

研究区位于波斯湾南部,属于伊朗、卡塔尔、沙特阿拉伯与阿联酋的交互地带,主体位于伊朗境内(图1a),作为世界上重要的产油气区,该地区油气勘探潜力巨大,目前是中国石油公司海外勘探的重点地区之一。

研究区位于阿拉伯板块的东部地区,属于新特提斯构造域中西段的一部分(图1b)。古生代期间,研究区所在的阿拉伯板块位于冈瓦纳大陆的东北部(Berberian and King, 1981; Torsvik and Cocks, 2004; Muttoni *et al.*, 2009; Enayati-Bidgoli and Rahimpour-Bonab, 2016);晚石炭世至中二叠世,冈瓦纳大陆北缘发生强烈的裂谷作用,早中二叠世形成了冈瓦纳大陆和Cimmerian地体(包括现今的伊朗中部、阿富汗、中国西藏中部、印支地区、马来西亚和安纳托利亚)之间的新特提斯洋(Angiolini *et al.*, 2003; Metcalfe, 2006)(图1b),研究区进入被动陆缘演化阶段

(McQuarrie *et al.*, 2003),沉积了Faraghan组(Unayzah组)碎屑岩与Dalan组碳酸盐岩地层(图1c、图2),整体的沉积厚度自南西向北东方向逐渐变大,并在局部地区存在高地(图2a);三叠纪期间,新特提斯洋持续扩张,并在晚三叠世扩张到最大,新特提斯洋岩石圈开始在伊朗地体南部发生俯冲,研究区最初的沉降机制为裂谷后的热沉降,随后被沉积物负载所取代(Alavi, 1994; Chiu *et al.*, 2013),基底断裂的活动导致沉积格局发生明显的变化(图2a);早白垩世,阿拉伯板块东部形成一个新的俯冲带,并可能发生了洋内俯冲(朱日祥等, 2022),随着俯冲作用在晚白垩世的结束,新特提斯洋洋壳向南与阿拉伯板块发生蛇绿岩仰冲(Searle *et al.*, 2004; Saccani *et al.*, 2013),研究区进入前陆盆地演化阶段;古近纪期间,随着新特提斯洋岩石圈与伊朗地体的持续俯冲,阿拉伯陆块与伊朗陆块发生碰撞,新特提斯洋关闭,形成扎格罗斯褶皱带(McQuarrie *et al.*, 2003; Chiu *et al.*, 2013; Koshnaw *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2023)。

中二叠世至早三叠世,研究区处于被动陆缘的构造环境,并以两次完整的海侵与海退构成(Haq and Al-Qahtani, 2005),自下而上可划分为Faraghan组、Dalan组、Kangan组及Khaneh Khat组(Dashtak组),本次研究的层位主要是Dalan与Kangan组(图2b)。Dalan组发育于二叠纪中晚期,与下部的二叠系乌拉尔统Faraghan组碎屑岩和上部三叠系Kangan组在局部地区不整合接触(图1c),在露头与钻井中,该组厚度介于500~800 m,并可根据岩性划分为Lower Dalan、Nar和Upper Dalan共三段,Lower Dalan段为一套灰岩夹白云岩沉积,Nar段主要为厚层硬石膏夹白云岩,Upper Dalan段主要为白云岩夹灰岩;Kangan组发育于早三叠世,厚度介于100~200 m,主要由石灰岩组成,中间夹白云岩,顶部与Khaneh Khat组蒸发岩整合接触。

2 层序地层特征

本次研究在前人对阿拉伯板块的层序划分方案的基础上(Sharland *et al.*, 2001; Haq and Al-Qahtani, 2005; Insalaco *et al.*, 2006),结合区域地层特征,综合岩性、电性、C-O同位素特征和沉积环境特征等相关资料,层序地层命名、定义和原则参考Schlager (2003)和Catuneanu *et al.* (2011)。本次共识别出6个层序界面和5个最大海泛面,将南波斯湾Fars地区

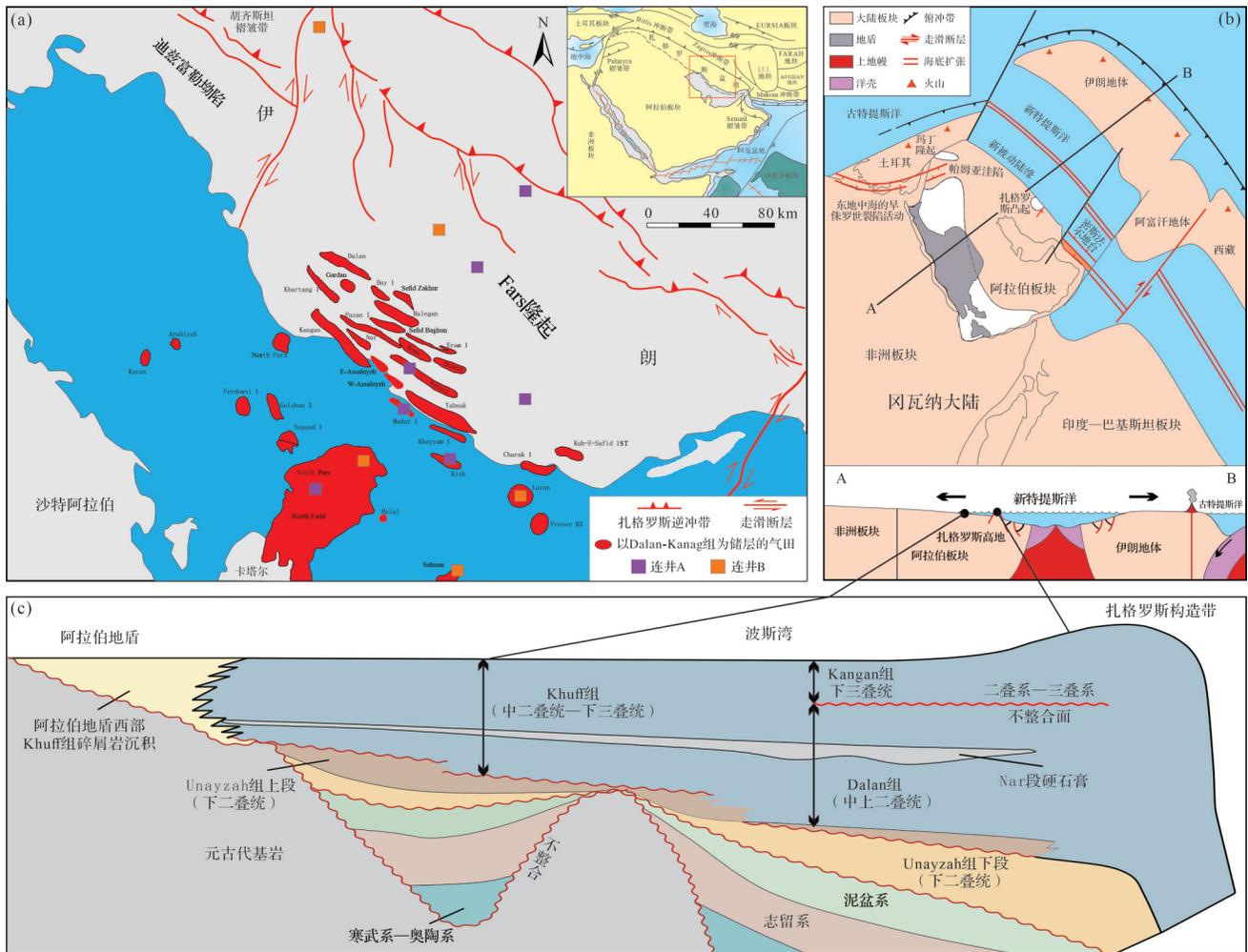


图1 (a)波斯湾南部Fars地区位置与气田分布图;(b)二叠纪—三叠纪拉伯板块重塑图 (据 Sharland *et al.*, 2001 修改); (c)阿拉伯板块至扎格罗斯构造带地层剖面图 (据 Enayati-Bidgoli and Rahimpour-Bonab, 2016 修改)

Fig.1 (a) Location and gas field distribution map of the Fars region and in the southern Persian Gulf; (b) schematic plate reconstruction of the Arabian Plate during the Permian-Triassic (modified from Sharland *et al.*, 2001); (c) cross-section from the Arabian Plate to the Zagros structural belt (modified from Enayati-Bidgoli and Rahimpour-Bonab, 2016)

Dalan 组与 Kangan 组共划分为 5 个三级层序(图 3), 整个沉积时限约为 19.7 Ma (Haq and Al-Qahtani, 2005), 每个三级层序发育的时限约为 3.94 Ma。

2.1 层序界面识别

SB1 位于 Dalan 组底部, 该界面之下是 Fraghan 组碎屑岩, 界面之上为 Lower Dalan 段的碳酸盐岩沉积, 是一个岩相转换与不整合界面, 指示沉积环境的重大转变(图 3、图 4a), 该界面之上 $\delta^{13}C$ 与 $\delta^{18}O$ 明显的正偏, 自然伽马(GR)测井曲线呈现出明显的正旋回, 指示相对海平面上升, 碎屑物质供给减弱, 碳酸盐开始大规模产出。

SB2 位于 Lower Dalan 段顶部区域, 形成于相对海平面下降速度大于盆地的沉降速率的条件下(图

5)。岩性上, 该界面上下岩相变化明显, 下部为灰岩与颗粒灰岩, 上部为白云岩和膏质白云岩沉积(图 3, 6~8), $\delta^{18}O$ 在界面之下出现明显的负偏, 指示大气降水作用的增强, GR 值在该界面附近显著增大, 指示沉积环境显著变浅(图 3)。

SB3 位于 Nar 段顶部区域, 该界面下部硬石膏含量不断增加(图 3, 6, 8), $\delta^{13}C$ 出现了明显的负偏现象, 野外露头上可见因沉积间断而形成的不整合面(图 4b, c), GR 曲线在该界面之上呈现呈齿状和箱形的复合形态, 指示沉积物随海平面上升的不断加积作用(图 4)。

SB4 位于 Upper Dalan 段下部区域, 该界面之下为颗粒灰岩—白云岩的岩性组合, 并伴有硬石膏等

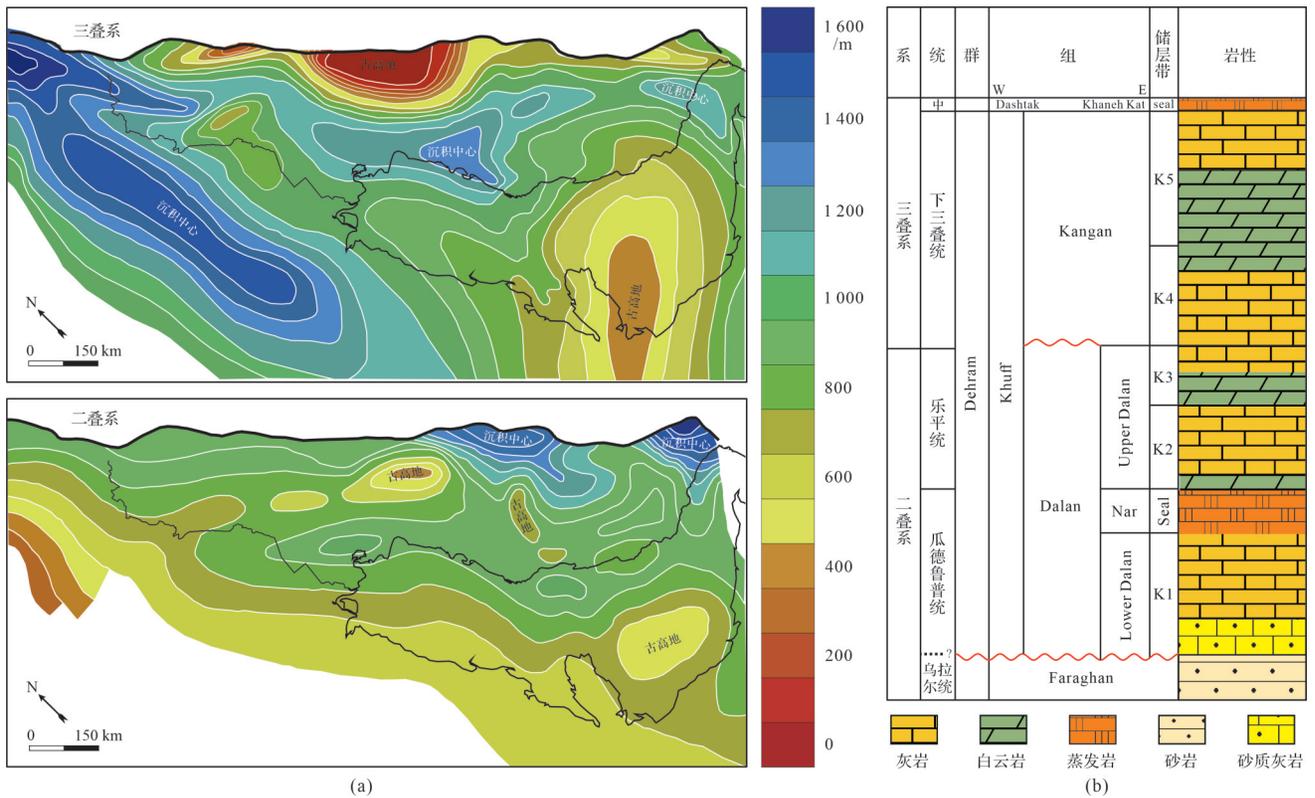


图2 (a)波斯湾地区二叠系与三叠系厚度等值线图(据 Esrafil-Dizaji and Rahimpour-Bonab, 2013 修改); (b)波斯湾南部地区晚二叠世至早三叠世地层柱状图

Fig.2 (a) Thickness contour map of Permian and Triassic strata in the Persian Gulf region (modified from Esrafil-Dizaji and Rahimpour-Bonab, 2013); (b) stratigraphic column of Late Permian to Early Triassic strata in the southern Persian Gulf region

蒸发岩沉积,GR测井曲线呈负旋回特征, $\delta^{18}O$ 显示出明显负漂移特征,指示沉积物到达海平面附近(图3、图4b),大气降水含量增多(图3)。

SB5是Dalan组与Kangan组的分界面,同时也是研究区二叠系与三叠系的分界面。海西造山运动导致阿拉伯板块发生隆起,沉积物遭受风雨淋滤作用,在阿拉伯板块内部形成暴露侵蚀面;同时,在此界面上发育一套微生物岩,下部为薄层的泥灰岩(图4d,e),这可能与P-T之交期间的全球古环境变化有关,此界面从岩石地层、碳同位素地层、生物地层或事件地层方面的界限都很一致。

SB6位于Kangan组顶部,是Kangan组与Khaneh Khat组的分界面,界面之下为Kangan组白云岩,界面之上为形成了蒸发环境的Khaneh Khat组蒸发岩(图2b)。

2.2 可容空间分析

Fischer图解又称可容空间图解,最早由Fischer在研究奥地利三叠系浅水碳酸盐岩的Lofter旋回时提出(苏德辰等,1995;李凤杰等,2006),后经Read

and Goldhammer (1988) 与 Osleger and Read (1991, 1993) 的完善,形成了纵坐标为经线性沉降校正的“累计旋回厚度偏移量”,横坐标为“旋回数”的可以用来近似地研究海平面变化的方法。浅水碳酸盐岩的沉积速率一般介于0.01~0.05 m/ka,最高可达2 m/ka,通常大于可容空间的变化速率,可容空间的变化主要受到相对海平面波动的控制(Schlager, 2003; Carpentier *et al.*, 2010)。可容空间的周期性变化势必会引起沉积物与沉积体系的周期性变化,层序地层及其边界形成的本质因素为可容空间与沉积速率的相对变化造成。浅水碳酸盐岩沉积速率一般大于海平面的变化速率,因此,沉积旋回厚度大,反映了可容纳空间的相对较大,海平面相对上升;沉积旋回厚度小,反映了可容空间减小,海平面相对下降。

中晚二叠世期间,构造沉降速率可假定为线性均匀变化,选取对岩性和沉积环境有较好响应的GR测井曲线数据,因二叠系Dalan组与三叠系Kangan组之间可能存在沉积间断,本文采用基于Python语言“PyFISCHERPLOT程序”的对Kuh-e Siah-1井Dalan

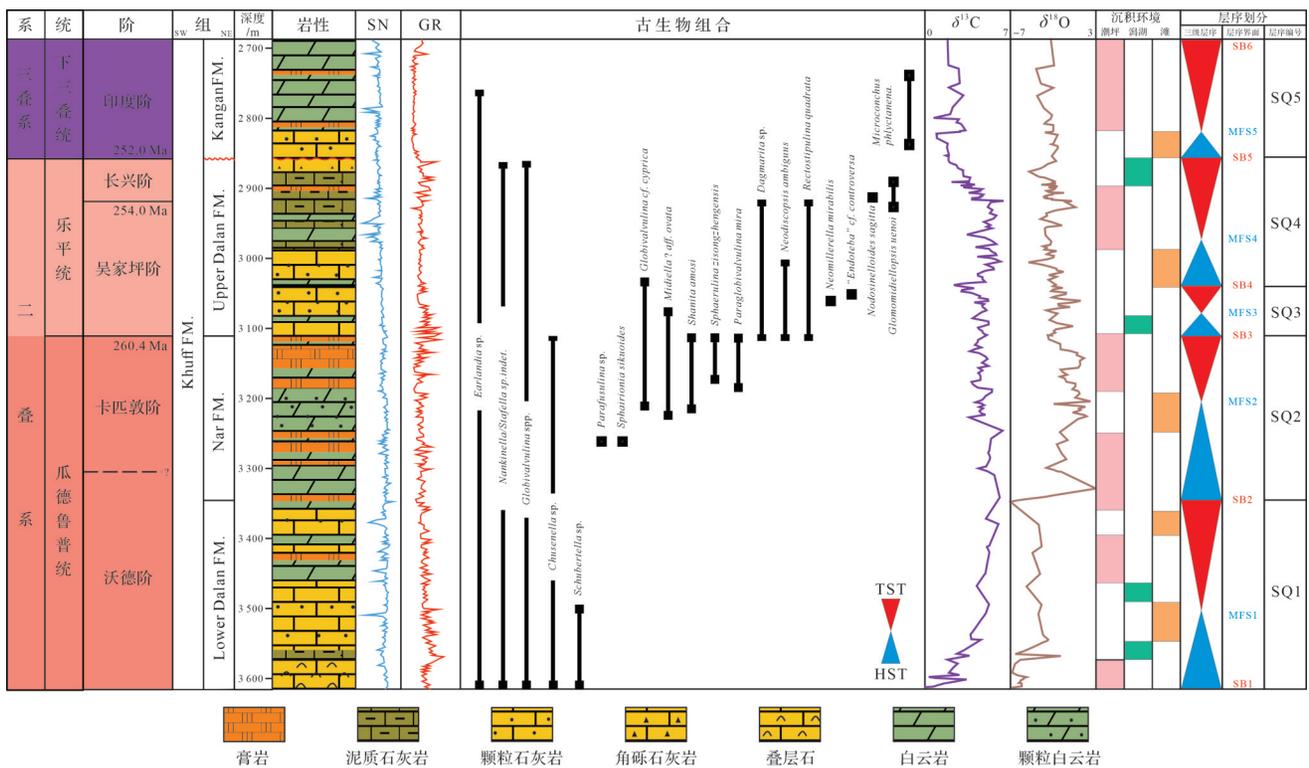


图3 波斯湾南部 Fars 地区 Dalan 组—Kangan 组层序地层划分图

地层数据与测井数据来自 Szabo and Kheradpir (1978); 碳氧同位素与古生物数据来自 Insalaco *et al.* (2006)

Fig.3 Sequence stratigraphic subdivision of Dalan Formation-Kangan Formation in Fars region, southern Persian Gulf
Stratigraphic and logging data from Szabo and Kheradpir (1978); C-O isotopes and paleontological data from Insalaco *et al.* (2006)

组 GR 数据进行旋回识别与划分, 并进行旋回厚度计算与 Fischer 图解绘制, 相关方法参考 Husinec *et al.* (2008) 和 Yang *et al.* (2021)。计算结果显示, 该井段 Dalan 组共发育 196 个旋回 (图 5), 旋回厚度介于 0.21~16.36 m, 平均旋回厚度约为 3.31 m。Dalan 组沉积时限约为 12.8 Ma (Haq and Al-Qahtani, 2005), 单个旋回的平均形成时间约为 65.3 ka。

Fischer 图解显示了 Dalan 组的海平面变化与前文所述的层序地层划分方案 (图 3) 及 Haq and Al-Qahtani. (2005) 所报道的阿拉伯板块相对海平面变化具有较强的一致性, 总体上是持续上升的过程, 全球平均海平面总体则呈现下降的趋势 (Haq and Al-Qahtani, 2005), 这预示着区域性的构造沉降可能是控制研究区相对海平面变化的主控因素。SQ1 的 Lower Dalan Formation 发育了一次显著的海侵—海退变化, 海平面快速上升期, 沉积物主要为灰岩和泥灰岩类, 沉积速率较高, 累计旋回厚度偏移量显著增大, 在相对海平面下降期, 研究区呈现为蒸发环境, 白云岩和硬石膏含量增多, 单个旋回的厚度较薄, 累计旋回厚度偏移量显著减少; SQ2 沉积期, 海平面变

化相对较小, 沉积物以蒸发环境的硬石膏和白云岩为主, 累计旋回偏移厚度在此期间多小于零, 指示碳酸盐岩的沉积速率远超过可容空间的变化速率; SQ3 沉积期, 海平面快速上升, 表现为由硬石膏向灰岩的快速转变, 累计旋回偏移厚度也随之迅速增加; SQ4 沉积期, 相对海平面整体较低, 白云岩和硬石膏的含量再次增多 (图 8), 导致累计旋回偏移厚度值位于零附近 (图 5)。

2.3 体系域与地层充填特征

根据层序界面的类型与最大海泛面的发育位置, 共识别 5 个海侵体系域 (TST), 5 个高位体系域 (HST), 低位体系域 (LST) 不发育 (图 3, 6~8)。

SQ1 海侵体系域发育在 Lower Dalan 段下部, 该层序的最大海泛面以一套灰岩—泥灰岩构成, 具有全区的可对比性 (图 8); SQ2 海侵体系域发育于 SQ1 沉积后的快速海侵, 主要发育在 Nar 段的下部, 该次海侵的时间较短, 规模较小, 沉积厚度较薄 (图 5), 主要形成一套反映水体逐渐加深的白云岩的沉积序列; SQ3 海侵体系域发育于 Upper Dalan 段下部, 形成了一套底部为硬石膏沉积, 向上逐渐转变为石灰岩的沉积序列;

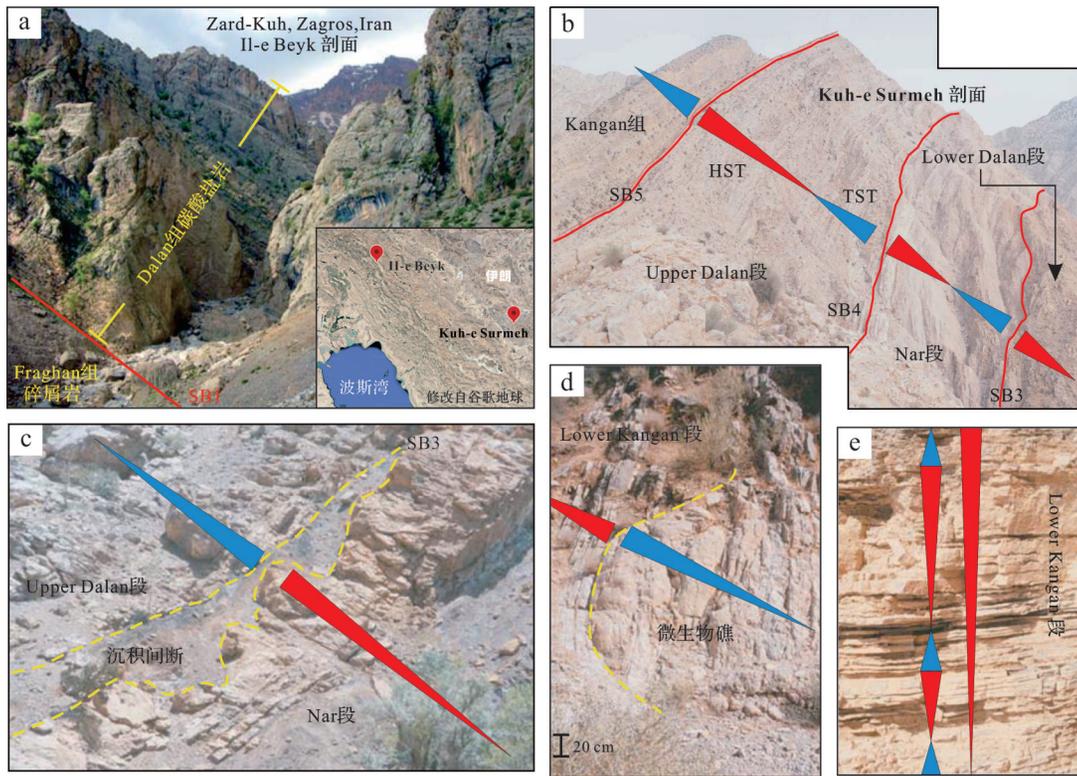


图4 波斯湾南部 Fars 地区 Dalan 组与 Kangan 组野外露头照片 (据 Insalaco *et al.*, 2006; Davydov and Arefifard, 2013 修改)

(a)来自 II-e Beyk 剖面; (b-e)来自 Kuh-e Surmeh 剖面

Fig.4 Outcrop photos of Dalan Formation-Kangan Formation in Fars region, southern Persian Gulf (modified from Insalaco *et al.*, 2006; Davydov and Arefifard, 2013)

(a) from the II-e Beyk section; (b-e) from the Kuh-e Surmeh section

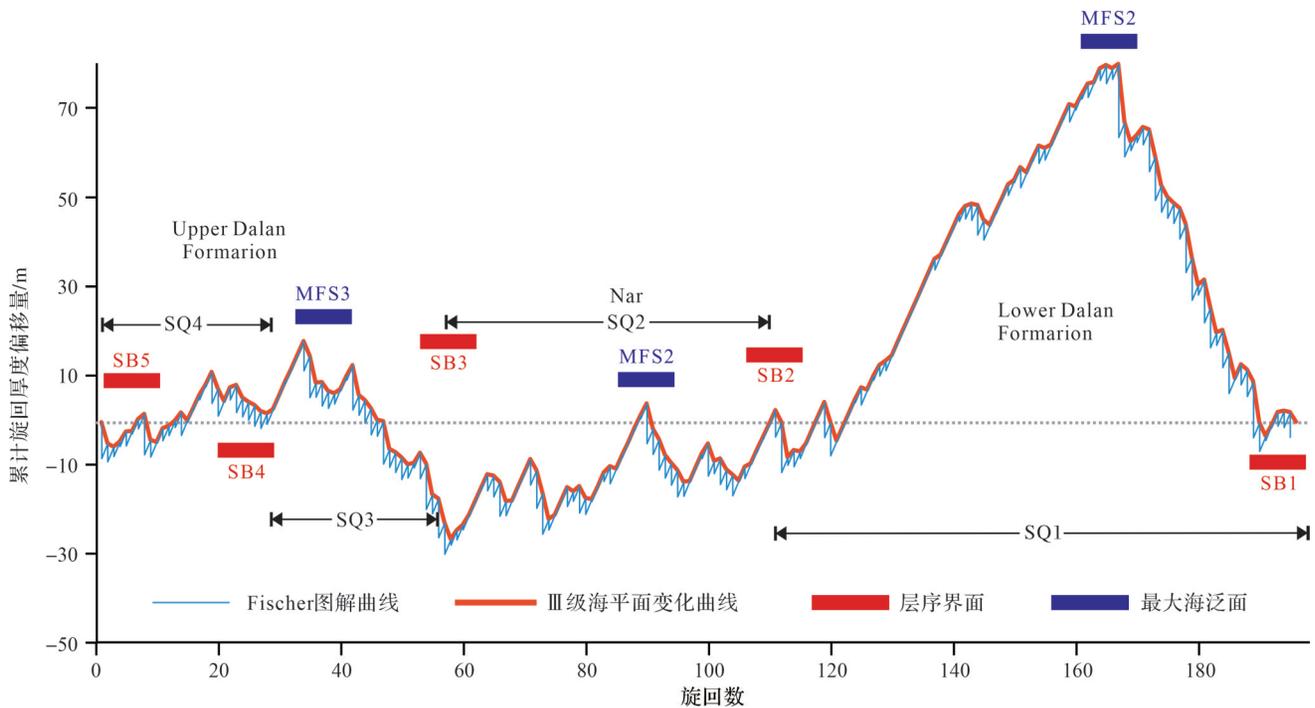


图5 Fars 地区 Kuh-e—Siah-1 井 Dalan 组 Fisher 图解

Fig.5 Fischer plot for the Dalan Formation of well Kuh-e - Siah-1 in Fars region

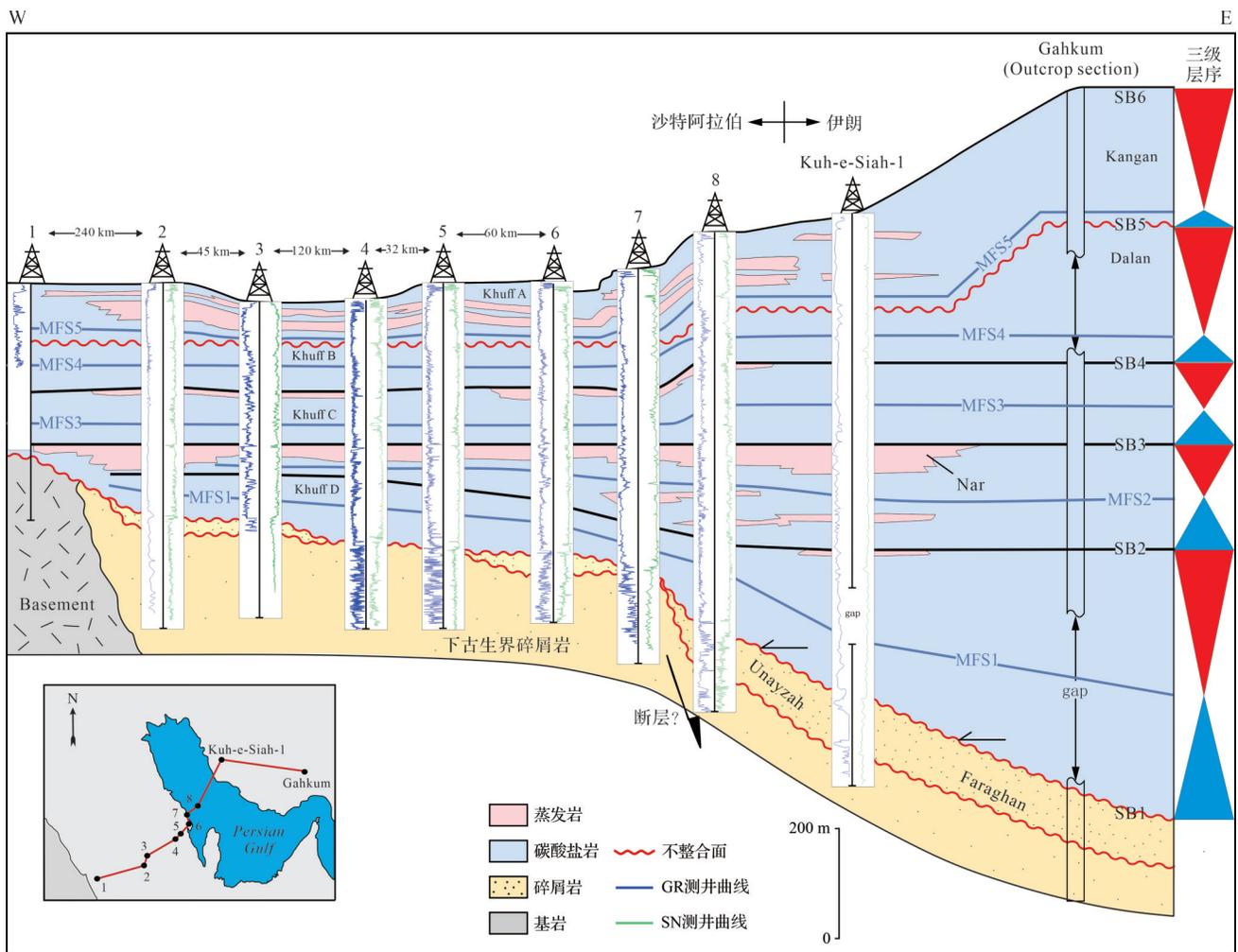


图6 沙特阿拉伯至伊朗地区 Dalan 组—Kangan 组层序地层对比和地层格架图

(据 Geert *et al.*, 2001; Sharland *et al.*, 2001 修改)

Fig.6 Stratigraphic sequence correlation and framework of Dalan Formation-Kangan Formation from Saudi Arabia to Iran (modified from Geert *et al.*, 2001; Sharland *et al.*, 2001)

SQ4海侵体系域发育于Upper Dalan段的顶部,形成了随海平面上升而发育的灰岩—泥灰岩的沉积序列(图7);SQ5海侵体系域发育于Kangan组,经历海西运动而导致长时间暴露后,又重新开始了—次大规模海侵作用,岩石类型以灰岩与泥灰岩类为主(图7)。

高位体系域发育于三级层序的上部,随着海平面的下降,水体变浅,蒸发作用与白云岩化作用增强,岩性主要以灰质云岩、白云岩夹硬石膏和云质灰岩等指示水体变浅的岩性组成。SQ1高位体系域发育于Lower Dalan段的上部,在Kuh-e Siah-1井上表现为早期颗粒灰岩(图3),后期形成了硬石膏与白云岩的沉积组合;SQ2高位体系域沉积期,全区的相对海平面相对较低,形成了一套全区可对比的硬石膏沉积(图6);SQ3层序高位体系域主要发育于Dalan组

上段的底部区域,岩性上,底部为灰岩沉积,向上逐渐转变为白云岩沉积(图8);SQ4高位体系域水体相对较深,沉积物以石灰岩为主,自南西向北东方向厚度不断增大。SQ5层序高位体系发育于Kangan组顶部,自西南向东北方向膏质与云质含量减少,反映了在该方向上水体逐渐变深(图6,7)。

绘制四条南西—北东向层序格架剖面,以揭示研究区层序地层充填规律(图6~8)。SQ1地层厚度介于181~363 m,并呈现出东厚西薄的特征,指示了西高东低的古地形特征;SQ2地层厚度自阿拉伯板块向Fars隆起不断增大(图4),在研究区厚度变化并不明显,总体厚度约250 m,岩石类型主要为白云岩与石膏组成,在顶部形成了连续可对比的硬石膏层,指示了沉积物的堆积速率远大于可容空间的增加速

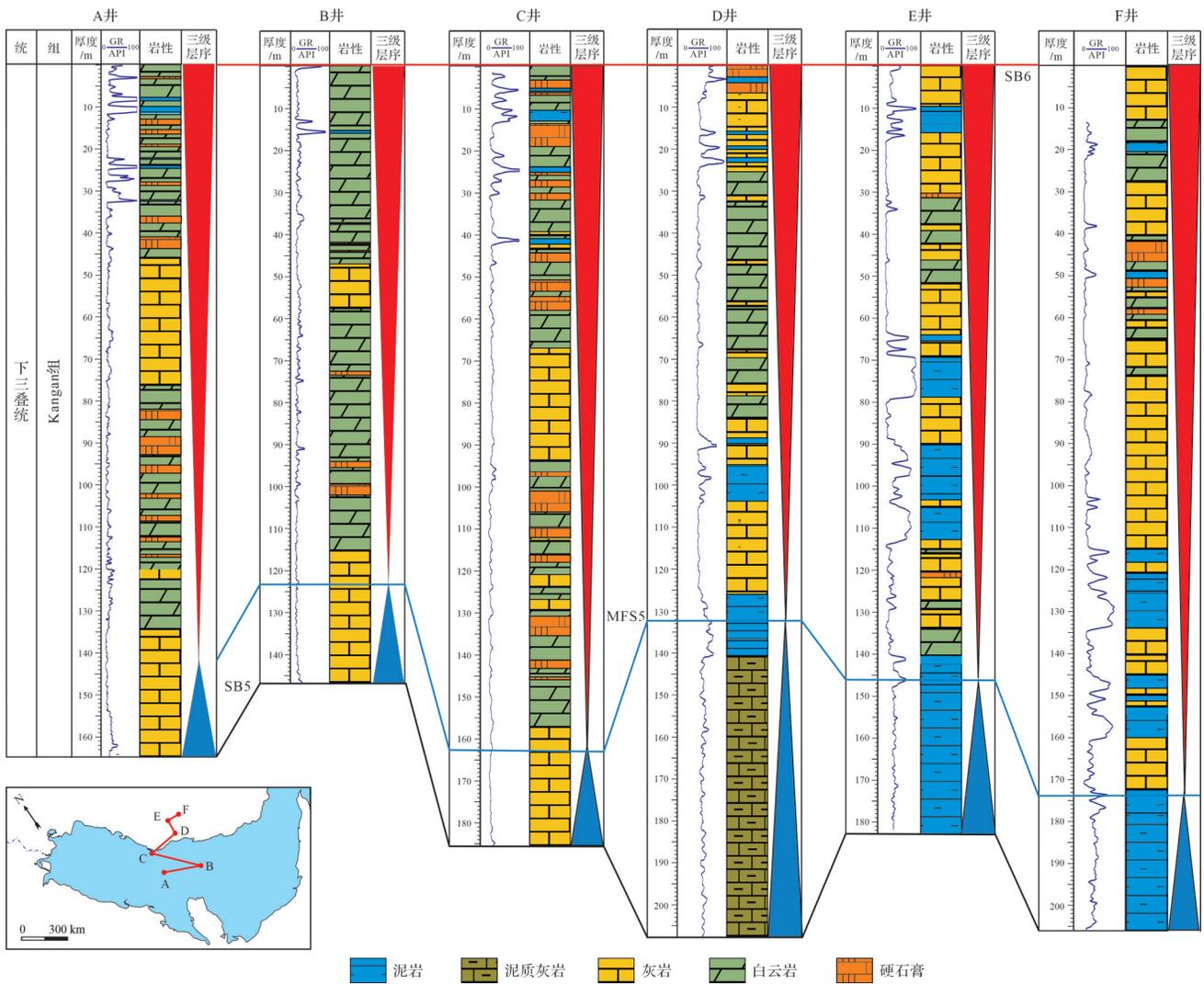


图7 波斯湾南部Fars地区Kangan组层序地层对比图

数据来源于 Szabo and Kheradpir, 1978; Esrafil-Dizaji and Rahimpour-Bonab, 2013; Enayati-Bidgoli and Rahimpour-Bonab, 2016

Fig.7 Stratigraphic sequence correlation of Kangan Formation in Fars region, southern Persian Gulf

date from Szabo and Kheradpir, 1978; Esrafil-Dizaji and Rahimpour-Bonab, 2013; Enayati-Bidgoli and Rahimpour-Bonab, 2016

率, 沉积物持续在远端发生前积。SQ3~SQ4 地层厚度整体上的厚度变化幅度不大, 沉积物以石灰岩为主, 沉积物的堆积速率近似等于或大于可容空间的增加速率。晚二叠世构造运动后, 研究区再次发生大规模海侵事件, 沉积了SQ5 地层, 从剖面上来看, 膏质含量自南西部向东北方向显著升高, 泥质含量降低, 揭示了该沉积期北东地区水体较深, 西南地区水体相对较浅的沉积环境特征(图7)。

3 沉积相类型及其特征

根据岩心观察和薄片鉴定, 结合测井和录井资料, 分析沉积构造与岩性组合特征, 结合地层格架

对比图的分析, 目的层系由浅水环境至深水环境的坡度平缓且厚度变化较均匀, 未发育大规模的台地边缘礁, 与深水区无明显的地形坡折(图6~8), 结合前人观点(Sharland *et al.*, 2001; Alavi, 2004; Insalaco *et al.*, 2006; Moradpour *et al.*, 2008; Enayati-Bidgoli and Rahimpour-Bonab, 2016), 南波斯湾 Fars 地区中二叠世至早三叠世为碳酸盐岩缓坡沉积, 并划分为内缓坡、中缓坡和外缓坡三种沉积亚相(表1)。

内缓坡位于海平面与晴天浪底之间, 是碳酸盐岩产量最高的沉积区域, 可细分为潮上带萨布哈、潮间坪、潟湖、滩后、滩中和滩前 6 种沉积微相(表1)。

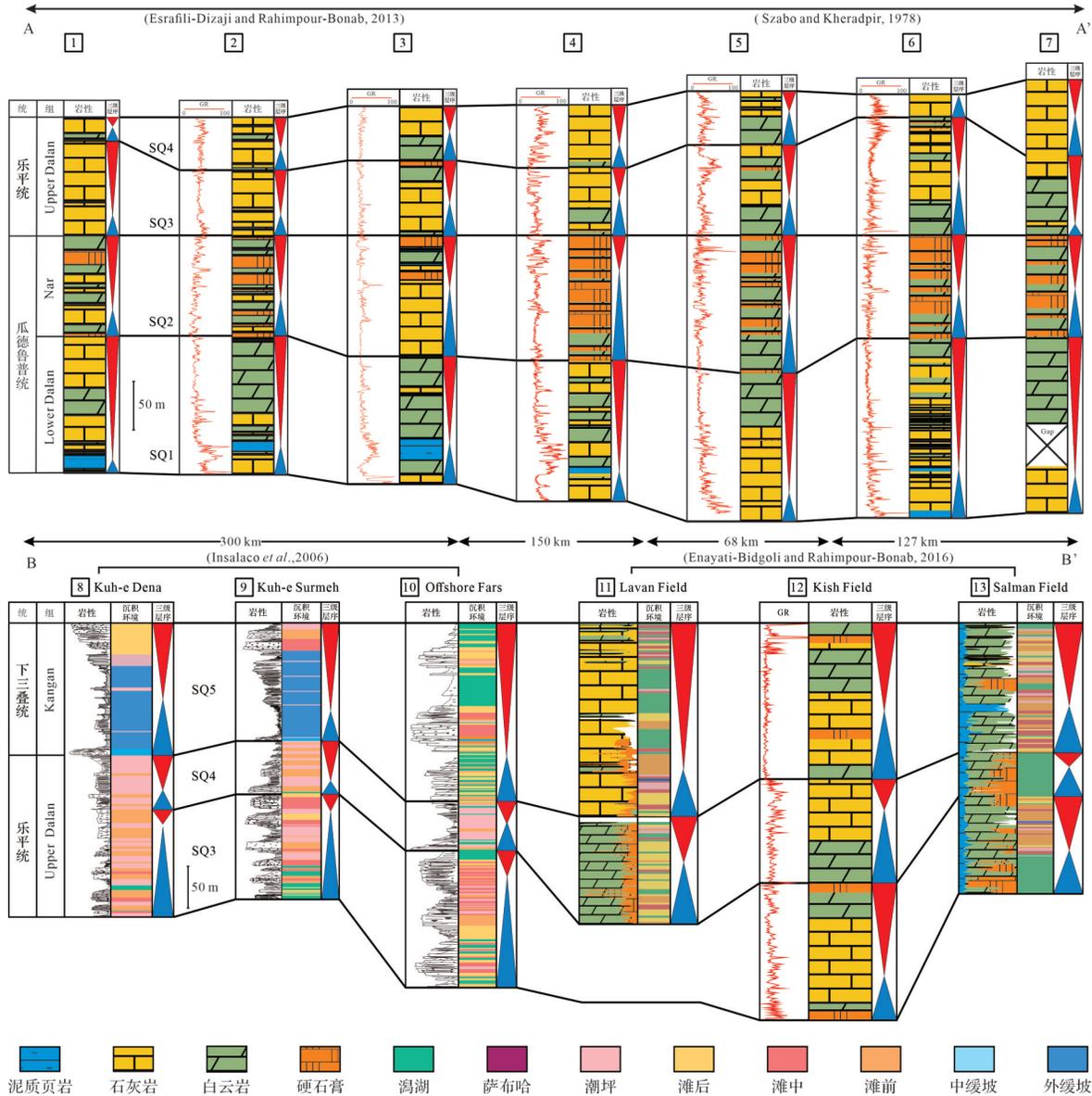


图8 波斯湾南部 Fars 地区 Dalan 组—Kangan 组层序地层对比和地层格架图

数据来源于 Szabo and Kheradpir, 1978; Insalaco *et al.*, 2006; Esrafil-Dizaji and Rahimpour-Bonab, 2013; Enayati-Bidgoli and Rahimpour-Bonab, 2016; 剖面位置见图 1a

Fig.8 Stratigraphic sequence correlation and framework of Dalan Formation-Kangan Formation in Fars region, southern Persian Gulf date from Szabo and Kheradpir, 1978; Insalaco *et al.*, 2006; Esrafil-Dizaji and Rahimpour-Bonab, 2013; Enayati-Bidgoli and Rahimpour-Bonab, 2016; The location of the cross-section is shown in Figure 1a.

潮坪相位于内缓坡向陆一侧,包括潮上带萨布哈及潮间带环境,其水动力条件较低,泥质含量相对较高,干热的气候条件下,盐度较大,准同生作用强烈。岩性上,该沉积环境以薄层膏岩、叠层石、含陆源碎屑的膏质白云岩为主(图9a,b),局部可见窗格构造,缺乏生物化石,发育水平层理与叠层石构造,镜下表现为泥粉晶结构,纵向上发育1~3 m不等,GR曲线偏高,呈现齿状结构,密度(RHOZ)曲线在潮间带相对较高(图9b),在潮上带萨布哈环境中相对较

低,中子孔隙度(NPHI)曲线相对较低(图9a)。

潟湖是地势相对低洼的半封闭或封闭的海域,水动力条件较弱,含盐度较高,缺乏广海动物群,岩性上多以较高含量的硬石膏和白云石为特征(图9c),泥质含量较高,碎屑颗粒以球粒和生屑为主,发育生物扰动构造,厚度相对较薄,GR测井曲线较高,整体呈齿状结构,RHOZ测井曲线偏低(图9c)。

颗粒滩位于海平面与晴天浪底之间,水体循环通畅、水动力较强,并可根据其水动力条件细分为滩

表1 南波斯湾Fars地区Dalan组—Kangan组沉积相划分简表

Table 1 Sedimentary facies classifications of Dalan Formation-Kangan Formation in Fars region, southern Persian Gulf

相	亚相	微相	主要岩性	古水深
缓坡相	内缓坡(F1)	萨布哈(MF1)	膏岩、膏质白云岩	正常浪基面之上
		潮间坪(MF2)	叠层石、云质灰岩、白云岩、含膏云岩	正常浪基面之上
		潟湖(MF3)	含石膏泥质灰岩、泥质灰岩、泥质白云岩	正常浪基面之上
		滩后(MF4)	颗粒灰岩、内碎屑颗粒灰岩	正常浪基面之上
		滩中(MF5)	鲕粒灰岩、鲕粒白云岩	正常浪基面之上
		滩前(MF6)	生屑颗粒灰岩、内碎屑颗粒灰岩	正常浪基面之上
	中缓坡(F2)	—	生屑灰岩、球粒与粪球粒灰岩	正常浪基面与风暴浪基面之间
	外缓坡(F3)	—	泥—微晶灰岩、泥灰岩	风暴浪基面之下

后(背风滩)、滩中(鲕粒滩)和滩前(迎风滩),三种沉积微相在垂向上相互叠置。滩后微相水动力相对较弱,岩性以泥—亮晶颗粒灰岩与白云岩为主,镜下可见基底式或孔隙式胶结类型,发育硬石膏胶结物,颗粒以鲕粒和生屑碎屑为主,颗粒的分选和磨圆度中等,GR测井曲线值相对较低且较为平直,RHOZ曲线与NPHI曲线相对较高(图9d)。

滩中沉积微相受波浪作用最强,岩性以亮晶的颗粒灰岩为主,颗粒以鲕粒为主,分选和磨圆度较好,泥质含量少,镜下可见接触式或镶嵌式胶结类型,发育粒间和粒内溶孔(图9e),垂向上,鲕粒滩厚度几米到几十米不等,GR曲线较为平直,并呈现微齿状的箱状结构特征,RHOZ曲线与NPHI曲线值相对较高,反映了滩中环境中的沉积物具有良好的储集物性特征(图9d)。

滩前沉积微相位于复合滩的向海一侧,水动力条件在复合滩体中能量较高,岩性以泥—亮晶颗粒灰岩与颗粒白云岩为主,碎屑颗粒以鲕粒、生物碎屑和内碎屑为主,泥质含量相对较高(图9f),并以基底式胶结和孔隙式胶结为主,GR曲线相较于滩中环境较高,呈现微锯齿形(图9f)。

中缓坡位于晴天浪底与风暴浪基面之间,水体相对较深,水动力较弱,岩性以泥晶灰岩和颗粒质灰岩为主,颗粒类型以生物碎屑、球粒与粪球粒为主,泥质含量相对较高(图9g)。

外缓坡位于风暴浪基面之下,水体较深,水动力较弱,岩性以泥—粉晶灰岩或泥灰岩为主,GR曲线相对较高(图9g)。

4 沉积模式

综合分析表明,中二叠世至早三叠世,研究区位于 $10^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{S}$ 之间(Sharland *et al.*, 2001),并处于炎热干旱的气候条件与被动陆缘的大地构造背景下(Peyravi *et al.*, 2010; 何治亮等, 2023; 朱日祥等, 2023),碳酸盐岩沉积速率较高,构造条件较平稳,发生了5次较大的海平面变化,并以此划分了5个三级层序,沉积体系受到可容空间与沉积速率的相对大小所控制。基于前述层序与沉积相特征分析,结合垂向与平面上的沉积环境定量统计(图10),以层序演化为时间线,绘制了研究区目的层系的层序—沉积演化模式图(图11),以表征研究区沉积期的沉积演化规律。

SQ1沉积期,经历过Kazanian裂谷事件后,研究区发生大规模的海侵,可容空间增大,沉积了Lower Dalan段碳酸盐岩。该沉积期早期发生快速海侵,海平面相对较高,沉积物以灰岩和泥灰岩类沉积物为主,随着沉积作用的不断演进,可容空间的增长速率远小于沉积物的堆积速率,白云岩类等蒸发沉积物增多,整体表现为前积型沉积模式(图11a)。

SQ2沉积期,基本继承了SQ1期的沉积格局,受区域相对海平面下降影响,研究区沉积水体较浅,沉积环境以潮上带萨布哈和膏质潟湖为主,沉积物以白云岩和硬石膏为主,可容空间的增长速率远小于沉积物的沉积速率,沉积地层不断发生前积作用,内缓坡面积不断增大,整体表现为前积型沉积模式(图11b)。

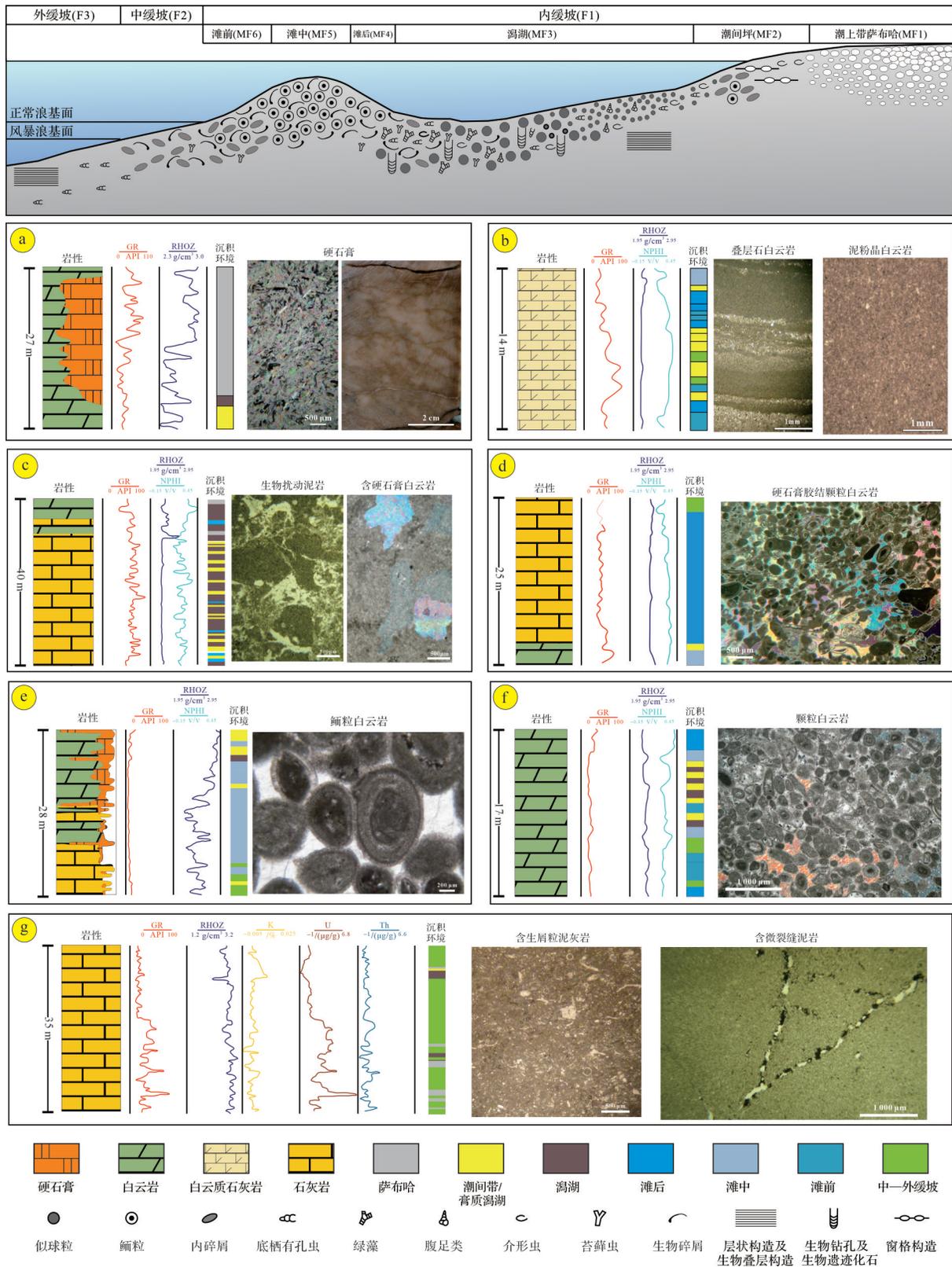


图9 波斯湾南部 Fars 地区 Dalan 组—Kangan 组不同沉积微相典型岩心与测井特征 (部分薄片照片来源于 Peyravi *et al.*, 2010; Kakemem *et al.*, 2023)

(a)MF1; (b)MF2; (c)MF3; (d)MF4; (e)MF5; (f)MF6; (g)F2-F3

Fig.9 Typical cores and logging characteristics of Dalan Formation-Kangan Formation with different microfacies in Fars region, southern Persian Gulf (partial thin section photos are from Peyravi *et al.*, 2010; Kakemem *et al.*, 2023)

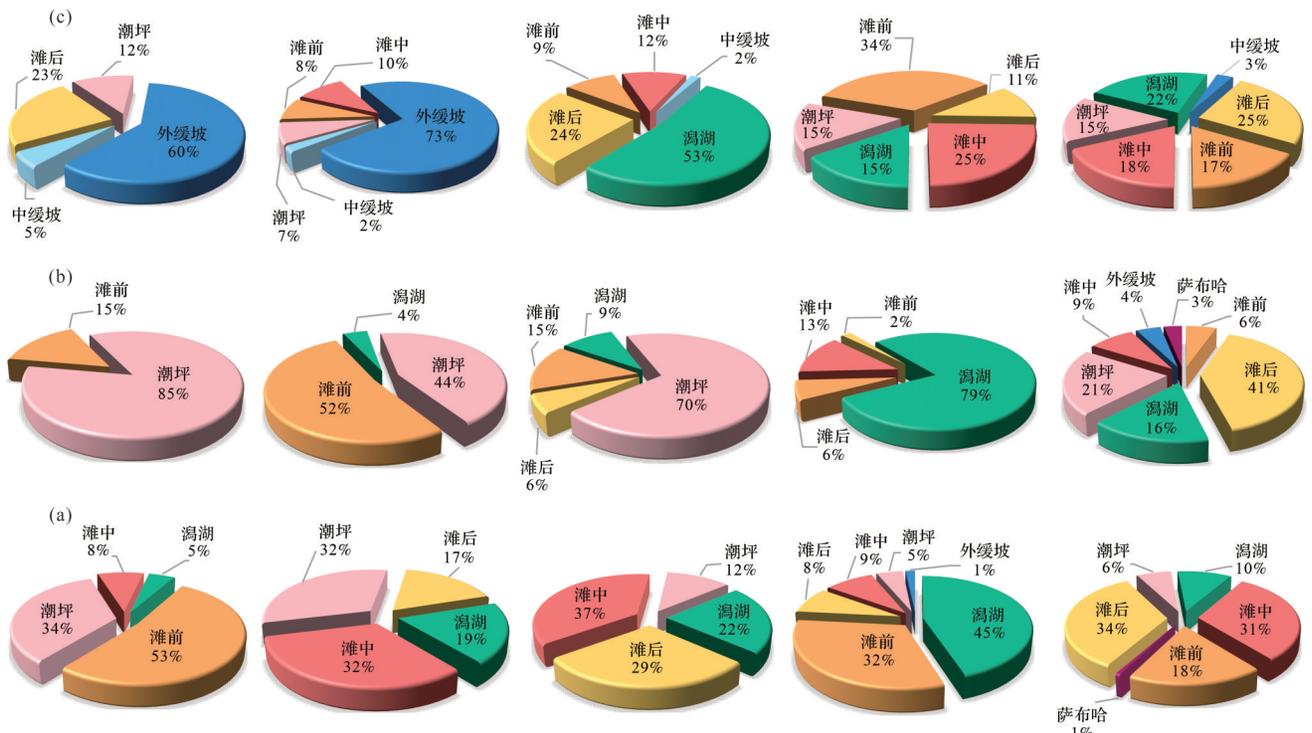


图10 波斯湾南部Fars地区Dalan组—Kangan组SQ3~SQ5层序沉积环境统计图
(从左至右,每列对应于一个图8剖面B所示的露头与油田,不包含Kish field)
(a)SQ3沉积期;(b)SQ4沉积期;(c)SQ5沉积期

Fig.10 Statistical distribution of sedimentary environment of Dalan Formation-Kangan Formation SQ3-SQ5 sequences in Fars region, southern Persian Gulf (From left to right, each column corresponds to an outcrop or well location shown in Section B of Fig. 8, excluding Kish field)

(a) SQ3 sedimentation period;(b) SQ4 sedimentation period;(c) SQ5 sedimentation period

SQ3沉积期,区域相对海平面快速上升,全区沉积特征发生变化,沉积物以灰岩为主,受地形和水体环境影响,在South Pars、Kish和North Pars等多个油气田内发育浅滩复合体(图10a),滩体分布最广,颗粒类型以鲕粒为主,并在垂向上叠置,可容空间的增长速率大于或等于沉积物的沉积速率,整体为碳酸盐岩退积与加积相叠加的沉积模式(图11c)。

SQ4沉积期,相较于SQ3沉积期,相对海平面降低导致了可容空间减少,内缓坡面积扩大(图10b),中缓坡面积减小,岩石类型以灰岩夹白云岩为主,向东北方向灰质成分逐渐增大,可容空间的增长速率小于沉积物的沉积速率,整体表现为前积型沉积模式(图11d)。

SQ5沉积期,在新特提斯洋持续扩张的背景下,基底断裂的重新活动导致研究区东北部发生热沉降,水体迅速加深,叠加二叠纪—三叠纪生物灭绝事件,碳酸盐产量减少,垂向上形成了由颗粒滩到外缓坡的沉积序列变化过程(图8),研究区西南部South

Pars等地区由内缓坡潟湖环境转换为颗粒滩环境(图10c),可容空间的增长速率大于沉积物的沉积速率,整体表现为退积型沉积模式(图11e)。

5 结论

(1) 建立了南波斯湾Fars地区晚二叠世至早三叠世层序地层格架,依据层序界面类型与最大海泛面的产出位置,将Dalan组和Kangan组划分为5个三级层序,每个三级层序由海侵体系域和高位体系域组成。

(2) 南波斯湾Fars地区Dalan组与Kangan组为碳酸盐缓坡沉积体系,为可划分为内缓坡、中缓坡和外缓坡3种沉积亚相,并可将内缓坡细分为潮上带萨布哈、潮间坪、潟湖、滩后、滩中和滩前共6种沉积微相。

(3) 中二叠世至早三叠世,研究区主体处于浅水沉积环境,并向西南方向水体逐渐加深。SQ1~SQ2沉积期发育碳酸盐岩前积型沉积模式,SQ3沉积期发

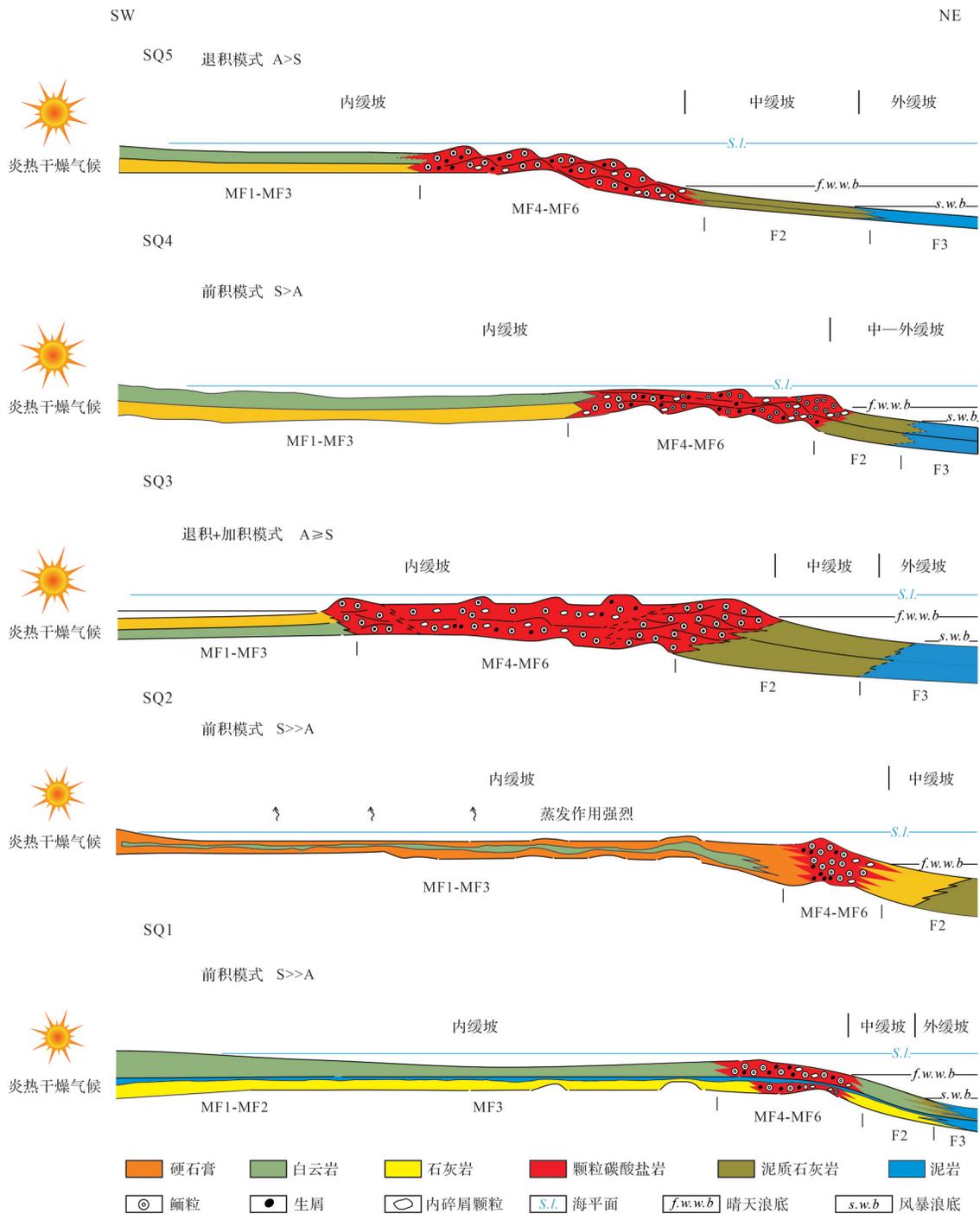


图 11 波斯湾南部 Fars 地区晚二叠世至早三叠世层序—沉积演化模式图

Fig.11 Sequence-sedimentary evolution model of Late Permian to Early Triassic in Fars region, southern Persian Gulf

育退积与加积的沉积模式, SQ4 沉积期发育前积的沉积模式, SQ5 沉积期发育退积型沉积模式, 区域构造所控制的容空间与沉积速率的相对变化是区域沉积演化的主控因素。

致谢 感谢三位审稿专家及编辑部老师对本文提出的意见和建议。

参考文献 (References)

白国平. 2006. 世界碳酸盐岩大油气田分布特征[J]. 古地理学报, 8(2): 241-250. [Bai Guoping. 2006. Distribution patterns of giant carbonate fields in the world[J]. Journal of Palaeogeography, 8(2): 241-250.]

何治亮, 金之钧, 李双建, 等. 2023. 特提斯演化控制下盆地原型、改造与油气差异富集: 基于波斯湾盆地与四川盆地的比较分析[J]. 中国科

- 学:地球科学,53(12):2914-2936. [He Zhiliang, Jin Zhijun, Li Shuangjian, et al. 2023. Prototypes, modifications, and hydrocarbon enrichment variations in basins influenced by Tethyan evolution: A comparative analysis of the Persian Gulf Basin and the Sichuan Basin[J]. *Science China Earth Sciences*, 53(12): 2914-2936.]
- 李凤杰,王多云,张庆龙,等. 2006. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组沉积相特征与层序地层分析[J]. *沉积学报*, 24(4): 549-554. [Li Fengjie, Wang Duoyun, Zhang Qinglong, et al. 2006. Sedimentary facies characteristic and sequence stratigraphy analysis of Yan-chang Formation in Longdong area, Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(4): 549-554.]
- 苏德辰,李庆谋,罗光文,等. 1995. Fischer图解及其在旋回层序研究中的应用:以北京西山张夏组为例[J]. *现代地质*, 9(3): 279-283. [Su Dechen, Li Qingmou, Luo Guangwen, et al. 1995. Method for drawing Fischer plots and its applications on studying cyclic sequences: Example from middle Cambrian Zhangxia Formation, western hills of Beijing[J]. *Geoscience*, 9(3): 279-283.]
- 王大鹏,白国平,徐艳,等. 2016. 全球古生界海相碳酸盐岩大油气田特征及油气分布[J]. *古地理学报*, 18(1): 80-92. [Wang Dapeng, Bai Guoping, Xu Yan, et al. 2016. Characteristics and hydrocarbon distribution of the Paleozoic giant marine carbonate rock oil-gas fields in the world[J]. *Journal of Palaeogeography*, 18(1): 80-92.]
- 朱日祥,张水昌,万博,等. 2023. 新特提斯域演化对波斯湾超级含油气盆地形成的影响[J]. *石油勘探与开发*, 50(1): 1-11. [Zhu Rixiang, Zhang Shuichang, Wan Bo, et al. 2023. Effects of Neo-Tethyan evolution on the petroleum system of Persian Gulf Superbasin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 50(1): 1-11.]
- 朱日祥,赵盼,赵亮. 2022. 新特提斯洋演化与动力过程[J]. *中国科学:地球科学*, 52(1): 1-25. [Zhu Rixiang, Zhao Pan, Zhao Liang. 2022. Tectonic evolution and geodynamics of the Neo-Tethys Ocean[J]. *Science China Earth Sciences*, 52(1): 1-25.]
- Abdolmaleki J, Tavakoli V, Asadi-Eskandar A. 2016. Sedimentological and diagenetic controls on reservoir properties in the Permian-Triassic successions of western Persian Gulf, southern Iran[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 141: 90-113.
- Alavi M. 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: New data and interpretations[J]. *Tectonophysics*, 229(3/4): 211-238.
- Alavi M. 2004. Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution[J]. *American Journal of Science*, 304(1): 1-20.
- Amel H, Jafarian A, Husinec A, et al. 2015. Microfacies, depositional environment and diagenetic evolution controls on the reservoir quality of the Permian Upper Dalan Formation, Kish gas field, Zagros Basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 67: 57-71.
- Angiolini L, Balini M, Garzanti E, et al. 2003. Gondwanan deglaciation and opening of Neotethys: The Al Khilata and Saiwan formations of interior Oman[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 196(1/2): 99-123.
- Berberian M, King G C P. 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(2): 210-265.
- Carpentier C, Lathuilière B, Ferry F. 2010. Sequential and climatic framework of the growth and demise of a carbonate platform: Implications for the peritidal cycles (Late Jurassic, North-eastern France)[J]. *Sedimentology*, 57(4): 985-1020.
- Catuneanu O, Galloway W E, Kendall C G S C, et al. 2011. Sequence stratigraphy: Methodology and nomenclature[J]. *Newsletters on stratigraphy*, 44: 173-245.
- Chiu H Y, Chung S L, Zarrinkoub M H, et al. 2013. Zircon U-Pb age constraints from Iran on the magmatic evolution related to Neo-Tethyan subduction and Zagros orogeny[J]. *Lithos*, 162/163: 70-87.
- Davydov V I, Arefifard S. 2013. Middle Permian (Guadalupian) fusulinid taxonomy and biostratigraphy of the mid-latitude Dalan Basin, Zagros, Iran and their applications in paleoclimate dynamics and paleogeography[J]. *Georabia Manama*, 18(2): 17-62.
- Enayati-Bidgoli A, Navidtalab A. 2020. Effects of progressive dolomitization on reservoir evolution: A case from the Permian-Triassic gas reservoirs of the Persian Gulf, offshore Iran[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 119: 104480.
- Enayati-Bidgoli A H, Rahimpour-Bonab H. 2016. A geological based reservoir zonation scheme in a sequence stratigraphic framework: A case study from the Permo-Triassic gas reservoirs, Offshore Iran [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 73: 36-58.]
- Esfafili-Dizaji B, Rahimpour-Bonab H. 2013. A review of Permo-Triassic reservoir rocks in the Zagros area, SW Iran: Influence of the Qatar-Fars Arch[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 36(3): 257-279.]
- Geert K, Afifi A M, Al-Hajri S A, et al. 2001. Paleozoic stratigraphy and hydrocarbon habitat of the Arabian Plate[J]. *GeoArabia*, 6(3): 407-442.
- Haq B U, Al-Qahtani A M. 2005. Phanerozoic cycles of sea-level change on the Arabian Platform[J]. *GeoArabia*, 10(2): 127-160.
- Husinec A, Basch D, Rose B, et al. 2008. FISCHERPLOTS: An Excel spreadsheet for computing Fischer plots of accommodation change in cyclic carbonate successions in both the time and depth domains [J]. *Computers & Geosciences*, 34: 269-277.
- Insalaco E, Virgone A, Courme B, et al. 2006. Upper Dalan member and Kangan Formation between the Zagros Mountains and offshore Fars, Iran: Depositional system, biostratigraphy and stratigraphic architecture[J]. *GeoArabia*, 11(2): 75-176.
- Jafarian A, Fallah-Baghtash R, Mattern F, et al. 2017. Reservoir quality along a homoclinal carbonate ramp deposit: The Permian Upper Dalan Formation, South Pars Field, Persian Gulf Basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 88: 587-604.
- Kakemem U, Ghasemi M, Adabi M H, et al. 2023. Sedimentology and sequence stratigraphy of automated hydraulic flow units-The Permian Upper Dalan Formation, Persian Gulf[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 147: 105965.
- Kakemem U, Jafarian A, Husinec A, et al. 2021. Facies, sequence

- framework, and reservoir quality along a Triassic carbonate ramp: Kangan Formation, South Pars Field, Persian Gulf Superbasin[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 198: 1081-1086.
- Koshnaw R I, Stockli D F, Schlunegger F. 2019. Timing of the Arabia-Eurasia continental collision-Evidence from detrital zircon U-Pb geochronology of the Red Bed Series strata of the northwest Zagros hinterland, Kurdistan region of Iraq[J]. *Geology*, 47(1): 47-50.
- McQuarrie N, Stock J M, Verdel C, et al. 2003. Cenozoic evolution of Neotethys and implications for the causes of plate motions[J]. *Geophysical Research Letter*, 30(20): 2036.
- Metcalfe I. 2006. Palaeozoic and Mesozoic tectonic evolution and palaeogeography of East Asian crustal fragments: The Korean Peninsula in context[J]. *Gondwana Research*, 9(1/2): 24-46.
- Moradpour M, Zamani Z, Moallemi S A. 2008. Controls on reservoir quality in the Lower Triassic Kangan Formation, southern Persian Gulf[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 31(4): 367-385.
- Muttoni G, Gaetani M, Kent D V, et al. 2009. Opening of the Neo-Tethys Ocean and the Pangea B to pangea a transformation during the Permian[J]. *GeoArabia*, 14(4): 17-48.
- Nosrati A, Kadkhodaie A, Amini A, et al. 2019. Reservoir properties distribution in the framework of sequence stratigraphic units: A case study from the Kangan Formation, Iranian offshore gas field, the Persian Gulf Basin[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 65: 1-15.
- Osleger D, Read J F. 1991. Relation of eustasy to stacking patterns of meter-scale carbonate cycles, late Cambrian, U. S. A. [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 61(7): 1225-1252.
- Osleger D, Read J F. 1993. Comparative analysis of methods used to define Eustatic variations in outcrop: Late Cambrian interbasinal sequence development[J]. *American Journal of Science*, 293(3): 157-216.
- Peyravi M, Kamali M R, Kalani M. 2010. Depositional environments and sequence stratigraphy of the early Triassic Kangan formation in the northern part of the Persian Gulf: Implications for reservoir characteristics[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 33(4):371-386.
- Rahimpour-Bonab H, Asadi-Eskandar A, Sonei R. 2009. Effects of the Permian-Triassic boundary on reservoir characteristics of the South Pars gas field, Persian Gulf[J]. *Geological Journal*, 44(3): 341-364.
- Read J F, Goldhammer R K. 1988. Use of Fischer plots to define third-order sea-level curves in Ordovician peritidal cyclic carbonates, Appalachians[J]. *Geology*, 16(10): 895-899.
- Saccani E, Allahyari K, Beccaluva L, et al. 2013. Geochemistry and petrology of the Kermanshah ophiolites (Iran): Implication for the interaction between passive rifting, oceanic accretion, and OIB-type components in the southern Neo-Tethys Ocean[J]. *Gondwana Research*, 24(1): 392-411.
- Schlager W. 2003. Benthic carbonate factories of the Phanerozoic[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 92(4): 445-464.
- Searle M P, Warren C J, Waters D J, et al. 2004. Structural evolution, metamorphism and restoration of the Arabian continental margin, Saih Hatat region, Oman Mountains[J]. *Journal of Structural Geology*, 26(3): 451-473.
- Sharland P R, Archer R, Casey D M, et al. 2001. Arabian Plate sequence stratigraphy[M]. Manama: GeoArabia Special Publication: 1-371.
- Sun G Y, Hu X M, Garzanti E, et al. 2023. Pre-Eocene Arabia-Eurasia collision: New constraints from the Zagros Mountains (Amiran Basin, Iran)[J]. *Geology*, 51(10): 941-946.
- Szabo F, Kheradpir A. 1978. Permian and Triassic stratigraphy, Zagros Basin, south-west Iran[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1(2): 57-82.
- Tavakoli V, Jamalian A. 2018. Microporosity evolution in Iranian reservoirs, Dalan and Dariyan Formations, the central Persian Gulf[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 52: 155-165.
- Torsvik T H, Cocks L R M. 2004. Earth geography from 400 to 250 Ma: A palaeomagnetic, faunal and facies review[J]. *Journal of the Geological Society*, 161(4): 555-572.
- Yang D, Huang Y, Chen Z, et al. 2021. A python code for automatic construction of Fischer plots using proxy data[J]. *Scientific Reports*, 11: 10518.

Sequence Stratigraphy and Sedimentary Evolution of Middle Permian to Early Triassic in Fars Region, Southern Persian Gulf

SU YuChi^{1,2}, BAO ZhiDong^{1,2}, ZHANG XinYu^{1,2}, XUE Jun^{1,2}, BAN ShuYue^{1,2}, XIA ChangSheng^{1,2}, LI ZongFeng^{1,2}, LI YiLin^{1,2}, SONG YiTing^{1,2}, LÜ DuiLin^{1,2}

1. School of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Exploration, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

Abstract: [Objective] The southern Persian Gulf Fars region is strategically significant for Chinese overseas explo-

Foundation: National Key Research and Development Project, No. 2017YFC0603104, 2018YFC0604304

Corresponding author: BAO ZhiDong, E-mail: baozhd@cup.edu.cn

ration due to its abundant Middle Permian to Lower Triassic oil and gas resources. However, currently available research lacks a comprehensive description of sequence stratigraphy and sedimentary evolution in this geological succession. The objective is to bridge these gaps. **[Methods]** This study focused on the middle to Late Permian Dalan Formation and the Lower Triassic Kangan Formation. Utilizing data from individual wells, cross-sections, core samples, thin sections, well logging, along with consideration of the regional geological context and taking existing knowledge into account, the study conducted sequence stratigraphic division of the target succession in the research area and conducted a detailed analysis of the characteristics and evolution of the depositional systems of each sequence. **[Results]** It was found that, in the study area, the Dalan Formation and Kangan Formation exhibit six sequence boundaries and five maximum flooding surfaces. On this basis, the stratum were divided into five third-order sequences, each comprising a transgressive systems tract and a highstand systems tract. Fischer plots based on gamma ray log curves for the Dalan Formation show significant transgressive and regressive processes during the SQ1 and SQ4 depositional periods. During the SQ3-SQ4 sequence development, limited accommodation space and a relatively low sea level were evident in the study area. The target succession represents a carbonate ramp depositional environment, further divided into inner-, middle- and outer ramp sub-environments. The inner ramp predominates, and was subdivided into six depositional microfacies: sabkha in the tidal zone, intertidal flat, lagoon, leeward shoal, mid-shoal, and seaward shoal. Each microfacies exhibits distinct lithologies such as anhydrite and anhydritic limestone in the sabkha and intertidal flat environments, limestone and anhydritic limestone in the lagoon environment, and grainstone and packstone in the shoal environments. The middle and outer ramp depositional environments were characterized by muddy limestone and marlstone with bioclasts. The sedimentation period in the study area was an arid and hot shallow-water carbonate depositional environment. During SQ1-SQ2 deposition, the rate of accommodation space growth was less than the sedimentation rate, leading to the development of a progradational depositional pattern. In the SQ3 deposition period, the rate of accommodation space growth exceeded the sedimentation rate, resulting in a retrogradational and aggradational depositional pattern. The SQ4 deposition period experienced a sea-level decrease, leading to a progradational depositional pattern. In the SQ5 deposition period, influenced by the expansion of the Neotethys Ocean, tectonic activity along the basement fault caused subsidence in the eastern region, increasing accommodation space. The main depositional pattern was retrogradational. **[Conclusions]** Through the analysis of sequence stratigraphic characteristics and depositional systems, combined with the evolution of global sea level and the Neotethys Ocean, it is concluded that the relative change between tectonically controlled accommodation space and sedimentation rate is the primary controlling factor for the regional sedimentary evolution.

Key words: sequence stratigraphy; sedimentary evolution; Dalan Formation; Kangan Formation; Middle Permian to Early Triassic; Fars region in southern Persian Gulf