

姜露珊, 栾锡武, 李作福, 等. 深水斜坡沉积特征与控制因素——以澳大利亚柔布克盆地为例[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(7): 45-55.

JIANG Lushan, LUAN Xiwu, LI Zuofu, et al. Characteristics and the controlling factors of sedimentation in deep-sea slopes: an example of the Roebuck Basin, Australia[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(7): 45-55.

深水斜坡沉积特征与控制因素

——以澳大利亚柔布克盆地为例

姜露珊¹, 栾锡武¹, 李作福¹, 肖菲^{2*}, 金龙¹, 薛洋¹

(1 山东科技大学地球科学与工程学院, 青岛 266590; 2 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237)

摘要:深水斜坡沉积规律对深水油气勘探开发以及深水地质灾害防护具有重要的研究意义。为揭示澳大利亚柔布克盆地新近纪深水斜坡沉积特征与控制因素, 利用高分辨率二维地震资料, 划分了斜坡沉积地层层序, 在地震剖面上识别出 7 个三级层序界面和 6 个地震层序。研究表明: 研究区新近纪主要形成了进积型、加积-进积混合型和退积型沉积层序; 柔布克盆地深水区发育前积型碳酸盐岩、硅质碎屑三角洲和滑塌 3 种斜坡沉积; 研究区深水斜坡沉积受多种因素共同控制, 中渐新世—晚中新世, 斜坡沉积主要受相对海平面升降、古气候变化和物源供给的控制, 而晚中新世之后, 向北漂移的澳大利亚板块与班达岛弧发生碰撞, 深水斜坡沉积主要受构造活动的控制。

关键词:深水斜坡沉积; 控制因素; 深水油气; 反射地震; 柔布克盆地

中图分类号: P736; P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.284

0 引言

近年来, 全球十大油气发现有 80% 位于深水区^[1-3]。深水油气已然成为世界瞩目的勘探新领域。在深水沉积物沿斜坡向盆地的输送过程中, 经历了复杂的“源-汇”沉积过程和物质循环, 且深水斜坡沉积在不同的沉积背景下, 存在显著的沉积规律差异^[4]。在大型河流注入的陆架斜坡上主要发育陆源硅质碎屑沉积^[5-6]; 在缺乏陆源输入的陆架、台地及其斜坡主要发育以内源沉积岩为主的碳酸盐沉积^[7-9]。此外, 深水斜坡沉积的内部结构和外部形态反映了地层的堆叠方式^[10], 可用于恢复大陆架或陆架边缘的古地貌、古水深, 揭示海平面相对升降、气候变化及物源等沉积影响因素^[11]。

收稿日期: 2023-12-15

资助项目: 国家自然科学基金(92055211, 42249801); 中国-东盟海上合作基金项目(2120100500017001)

第一作者: 姜露珊(2000—), 女, 在读硕士, 主要从事海洋地质方面的研究工作。E-mail: 1102172727@qq.com

* 通讯作者: 肖菲(1978—), 女, 高级工程师, 主要从事海洋地质方面的研究工作。E-mail: xiaofei_hds@163.com

澳大利亚西北大陆架是全球被动大陆边缘油气研究的重要地区, 其中, 已探明的油气田集中分布在西北陆架中的北卡纳封盆地、布劳斯盆地和波拿巴盆地^[12-14]。柔布克盆地深水区油气勘探开发始于 20 世纪 60—80 年代末, 相较油气开采率较高的北卡那封盆地及其他相邻盆地^[13-14], 其油气勘探开发程度较弱, 油气地质条件尚不明确。研究发现, 澳大利亚柔布克盆地和北卡那封盆地发育了大规模深水斜坡沉积^[15-16]。因此, 开展柔布克盆地深水斜坡沉积的沉积规律及控制因素研究, 对深水油气资源勘探开发具有重要意义。

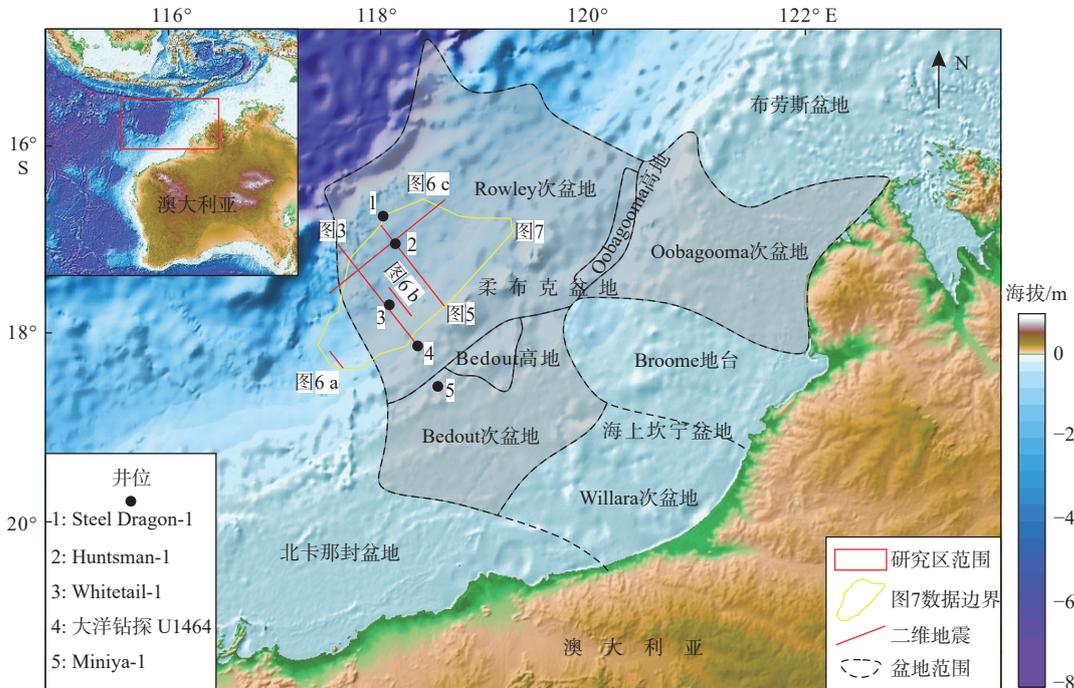
本文基于层序地层、地震地层和沉积岩石学, 利用高分辨率二维地震数据, 结合前人研究及公开油气井、大洋钻探 U1464 井资料, 对柔布克盆地新近纪地层层序进行划分, 并通过地震相识别, 系统研究其深水斜坡沉积特征与控制因素。

1 区域地质背景

澳大利亚西北大陆架是冈瓦纳大陆裂解后发育的典型被动大陆边缘, 东南接澳洲大陆, 西南滨临印度洋, 北隔帝汶海槽与帝汶岛^[17]。柔布克盆地

位于澳大利亚西北大陆架中部,与北卡纳封盆地、布劳斯基盆地相邻,西北到阿尔戈深海平原,东南与澳洲大陆水下延伸的海上坎宁盆地相接^[18]。柔布克盆地包括3个次级构造单元,分别为Rowley次

盆地、Bedout次盆地(负向构造单元)和Oobagooma次盆地^[8,19](图1)。北卡纳封盆地与布劳斯基盆地油气富集且勘探程度较高,勘探面积超 10^4 km^2 ,尤其是北卡纳封盆地已进行油气开采^[17]。



据文献^[17-18]修改

图1 澳大利亚柔布克盆地构造单元

Fig.1 Tectonic setting of the Roebuck Basin, Australia

柔布克盆地的形成始于早石炭世—晚二叠世的NW—SE向伸展阶段,为古西澳超级盆地的一部分^[15]。柔布克盆地经历了陆内裂陷期、克拉通边缘拗陷期、被动裂陷期和漂移期4个演化阶段^[20],现今呈NE—SW向展布。盆地内二叠纪基底沉积以碳酸盐岩为主,往上主要沉积中生代地层^[8]。早白垩世早期,古特提斯洋不断扩张,澳大利亚板块逐渐与印度板块分离,并向北漂移与欧亚板块碰撞^[21-22],期间形成构造不整合面,标志着柔布克盆地演化为被动大陆边缘盆地^[23]。与此同时,盆地在近EW向伸展应力作用下局部断裂再度活化,导致西部发生差异性隆升,而东部发生拗陷沉降^[24]。晚白垩世,北部古特提斯洋持续扩张,造成盆地北部发生隆升。在洋壳不断挤压和板块加速移动的影响下,盆地隆升持续到了古近纪^[25]。渐新世—中新世,柔布克盆地自下而上发育了Mandu组海相碳酸盐岩、Trella组灰岩、Bare组三角洲砂岩和Delamber组海相碳酸盐岩。依据文献资料^[15-16,20,26],总结了研究区主要地质构造事件及地层柱状图(图2)。

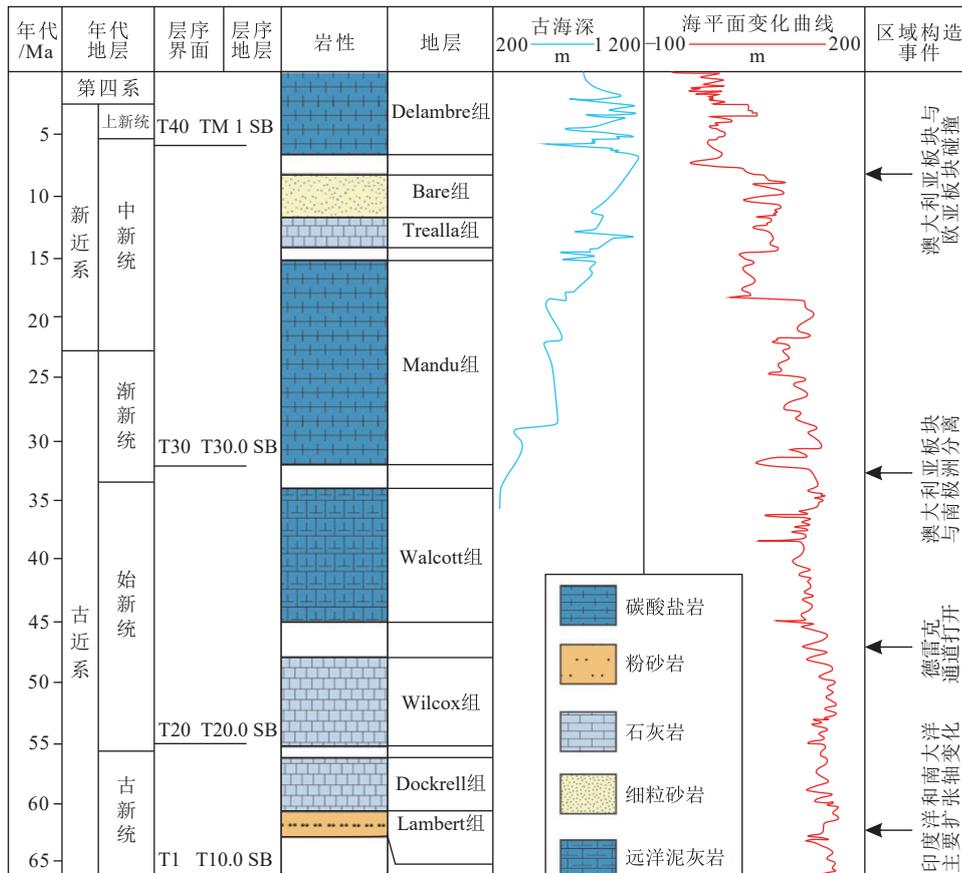
2 数据来源

本数据主要来自中国-东盟海洋地震数据平台与研究区提供的位于澳大利亚柔布克盆地西部的高精度二维地震数据。该数据是ENERGY公司于1999年委托GECO-PRAKLA公司采集的,原二维测线共182条,主体为NE—SW向和NW—SE向,具体采集参数如表1所示。研究区附近有5口公开油气井,分别为Whitetail-1井、Steel Dragon-1井、Miniya-1井、Huntsman-1井及大洋钻探U1464井。研究区位于西澳大陆架的陆坡(水深200~2500m)与大陆基(水深2500~4000m)过渡处,二维研究区水深100~300m,面积约为 $18\times 10^4\text{ km}^2$ 。

3 斜坡沉积地震相识别

3.1 斜坡沉积地层层序划分

本文研究目标层为渐新统一上新统,地震相清



据文献 [15-16,20,26] 修改

图 2 柔布克盆地地层综合柱状图

Fig.2 Integrated histogram of Roebuck Basin stratigraphy

表 1 二维地震数据采集具体参数

Table 1 Specific parameters of 2D seismic data acquisition

采样间隔/ms	道间距/m	拖缆沉放深度/m	拖缆长度/km	最大记录时长/s	总长/km
2	12.5	6	6	7	13 142.7

晰,易于识别。研究区盆地内主要发育 SE—NW 向叠置的斜坡沉积体系,斜坡沉积体倾斜度约 2.8°~7.4°。结合前人对柔布克盆地和北卡那封盆地地层层序划分的研究结果^[5,15-16,20],在研究区自下而上共识别出 SB1—SB7 共 7 个三级层序界面,和 OL1 (上渐新统)、OM1(下中新统下部)、EMM1(下中新统上部)、MM1(中中新统下部)、MM2(中中新统上部)、ML1(下中新统)共 6 个地震层序(图 3),各层序地层地震反射特征如下:

(1) OL1 (上渐新统)

中渐新世—晚渐新世,盆地发生第 1 次海退,陆相沉积物逐渐增加^[19],Mandu 组沉积了一套楔形前积层序。此时楔形前积层坡度较小,坡度范围为 2.8°~4.4°。楔形体底部下超面 SB1 即上渐新统底,地震剖面上呈中—强振幅,连续性较好的反射特征;

SB2 对应上渐新统顶、下中新统下部底,地震反射特征表现为中等频率、强振幅、连续性较好。

(2) OM1 (下中新统下部)

晚渐新世—早中新世中期,楔形前积层由于海平面迅速上升而被迫终止。层序边界 SB3 对应下中新统下部顶、下中新统上部底,地震剖面上表现为中频、强振幅,连续性好的反射特征。下中新统下部地层受海平面快速上升的影响,Mandu 组楔形前积层逐渐演化为 S 形前积层,导致前积坡度增大,为 4.4°~5.4°。

(3) EMM1 (下中新统上部)

早中新世中期—晚期,盆地发生第 2 次海退,但此次相对海平面下降缓慢,且早中新世物源供给增强^[27-28]。在此影响下,盆地内碳酸盐岩快速沉积,致使 Mandu 组沉积了厚层的碳酸盐岩斜坡相地层,

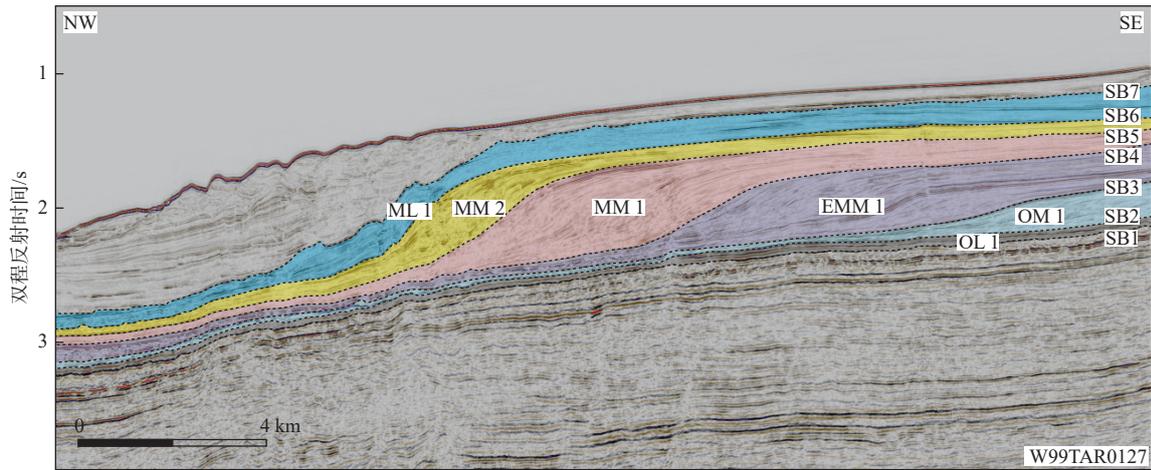


图3 斜坡沉积地层层序划分

Fig.3 Stratigraphic division of slope sedimentary stratigraphy

地层内部发生由前积层序向进积层序的转变。随着海平面的缓慢下降和物源供给的增强,该地层坡度从 4.4° 逐渐增加到 6.3° 。SB4即下中新统上部顶界面、中中新统下部底界面,地震剖面上可识别出弱—中振幅、中频、中等连续性的反射特征。

(4) MM1 (中中新统下部)

早中新世晚期—中中新世中期,相较于第2次海退持续时间,第2次海侵发生的持续时间较短,仅沉积了较薄的Trella组地层。地层内坡折点均低于相邻的2次海退形成的前积层坡折点,坡度范围为 $5.7^{\circ}\sim 6.3^{\circ}$ 。SB5即中中新统下部顶界面、中中新统上部底界面,界面反射特征表现为中等振幅、中频率、连续性较好的单向反射同相轴。

(5) MM2 (中中新统上部)

中中新世中期开始发生第3次海退,一直延续到晚中新世,以进积、加积为主^[6]。中中新世晚期,陆源碎屑沉积物供给充足^[5,29],在以碳酸盐岩为主的沉积地层上沉积了一套Bare组硅质碎屑岩,导致斜坡地形快速变陡,坡度范围为 $5.7^{\circ}\sim 7.4^{\circ}$ 。SB6中中新统上部顶界面、上中新统底界面,地震剖面上呈强振幅、较高频率、连续性较好的反射特征。

(6) ML1 (下中新统)

晚中新世以来,陆源沉积物源源不断向盆地注入^[30],进积层序持续发育,斜坡倾斜度达到最大。随着盆地NW向的延伸,斜坡沉积受上新世早期第3期海侵事件及物源供给的控制,坡度开始减小。远离物源的位置水动力条件和沉积物搬运作用逐渐减弱,逐渐形成了稳定的Delamber组碳酸盐沉积,并在上新世至第四纪回到海相沉积环境^[31]。

SB7即上中新统顶界面,地震反射特征表现为中—强振幅、中频、连续性较好。

除上述地层解释外,结合大洋钻探U1464井资料,在地震剖面上还识别出其他2个明显的标志层(TM1、TM2)。TM1不整合面对应Bare组顶和Delamber组底,认为该不整合是区域不整合,地震反射特征表现为高振幅连续型波谷。整体地层同海底地层走向一致,向NW向倾斜。TM2是TM1前积层序的底部地层,岩性上对应Mandu组灰岩顶和Trella灰岩底。地震剖面上可识别出高振幅连续型波谷的反射特征,该层序界面呈NW向倾斜,但随着地层发育的一系列NNW—SSE向小断层,地层倾斜程度逐渐被减弱。

3.2 斜坡沉积地震相

新近纪以来,柔布克盆地内主要为浅海—半深海沉积环境,沉积了较稳定的海相碳酸盐岩。自晚中新世顶部开始,盆地沉积环境以海相泥页岩为主^[27],最大沉积厚度可达 1.6×10^4 m。

OL1—MM2地层内,地震相单元在地震剖面上识别出楔状、席状、透镜状的外形;内部反射结构为S形前积结构、斜交前积反射结构和S形—斜交复合型前积反射结构;各层序内地震相多呈现弱—中地震振幅、中频率、连续性较好的特征。ML1斜坡沉积地层上为晚中新世发育Delambre组海相泥页岩沉积,外部几何形态均为丘状(图4)。

3.2.1 碳酸盐岩地震相

结合前人研究及上述斜坡沉积地层层序精细划分工作,认为碳酸盐岩斜坡沉积地质年代为早渐新世—中中新世晚期,沉积环境为海陆过渡相和海

地层 (地质年代)	地震剖面	外部几何形态	内部反射结构	振幅、频率、连续性
OL1 (中渐新世—晚渐新世)		席状、楔状	平行、亚平行结构	弱—中振幅 中频率 连续性较好
OM1 (晚渐新世—早中新世中期)		透镜状	S形前积结构	弱—中振幅 中频率 连续性较好
EMM1 (早中新世中期—早中新世晚期)		透镜状	S前积结构、 斜交前积反射结构	弱—中振幅 中频率 连续性较好
MM1 (早中新世晚期—中中新世中期)		透镜状	S形前积结构、 斜交前积反射结构	强振幅 较高频率 高连续性
MM2 (中中新世中期—晚中新世)		透镜状	S形与斜交复合型 前积结构	强振幅 较高频率 高连续性
ML1 (晚中新世—上新世)		丘状	杂乱反射、 亚平行反射结构	强振幅 弱连续性

图 4 斜坡沉积地层地震相类型

Fig.4 Seismic phase types of slope facies deposits

相。Huntsman-1 钻井资料显示, 楔形碳酸盐岩沉积体在柔布克盆地大规模发育(图 5)。中渐新世时期, 柔布克盆地继续向北漂移, 发育了碳酸盐岩楔状前积体。受同期海侵海退事件影响, 地震相内部反射结构由斜交型前积结构逐渐转变为 S 形前积结构, 外部几何形态由楔形演化为透镜状; 层序顶底界面发生向陆上超, 斜坡沉积地层呈加积-进积混合型层

序(图 6 a)。

3.2.2 硅质碎屑三角洲沉积地震相

中中新世晚期, 随着澳大利亚板块持续向北漂移, 亚热带干旱性气候增强^[32], 造成大量硅质碎屑沉积物向盆地输入, 导致碳酸盐岩陆坡上覆硅质碎屑三角洲沉积, 地层呈前积层序(图 6b)。地震相单元外部几何形态呈透镜状, 内部反射结构为 S 形前

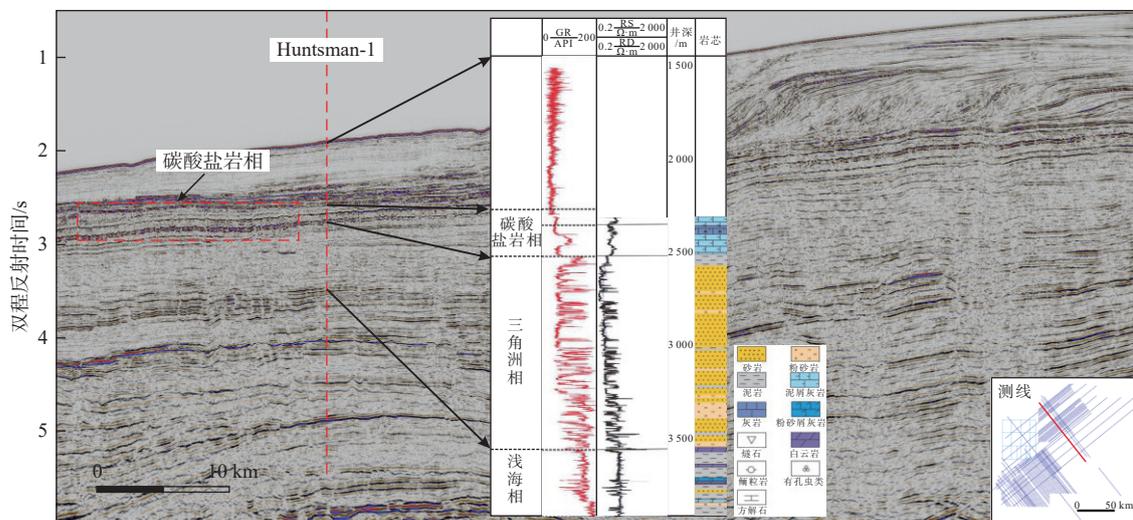
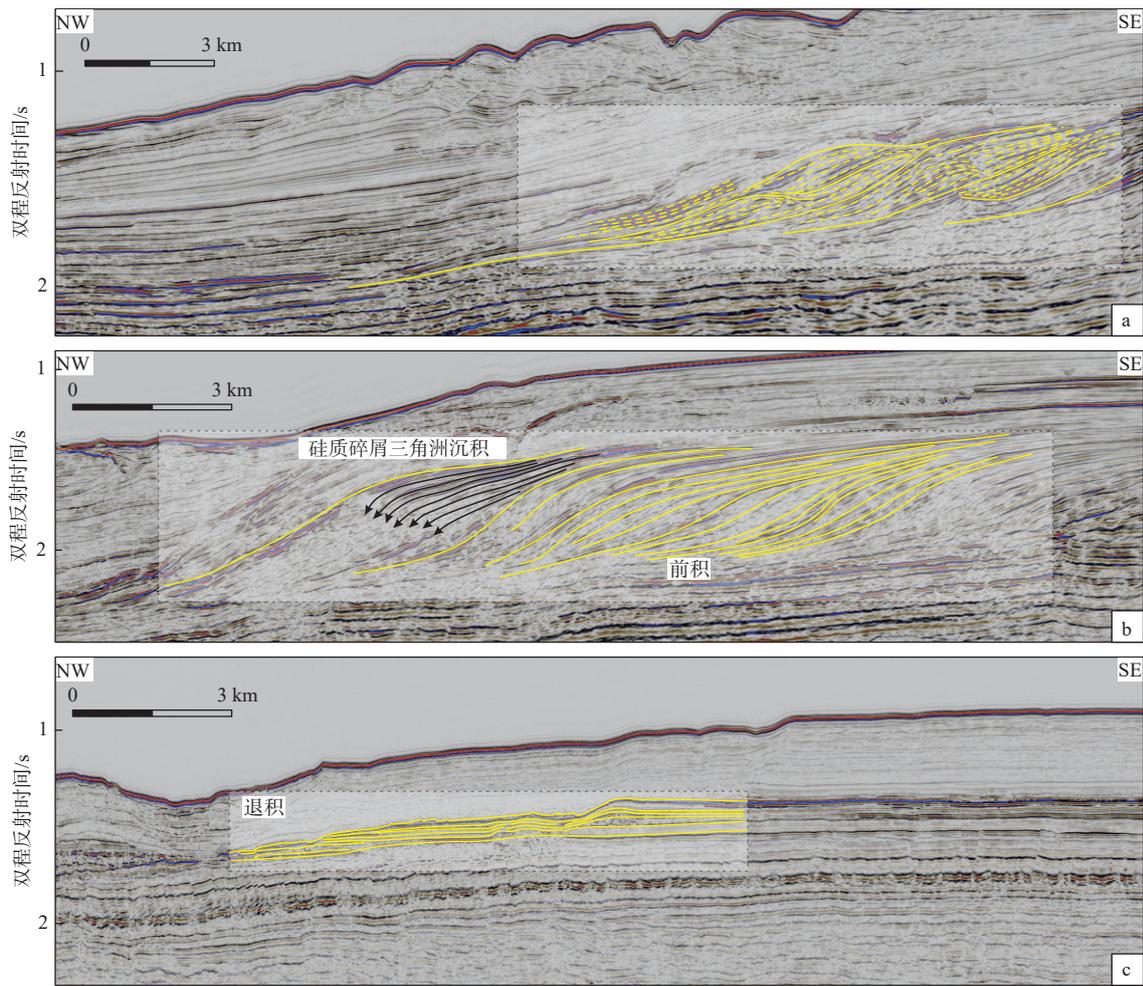


图 5 碳酸盐岩地震相

Fig.5 Seismic phases of carbonate rocks



(a) 加积-进积复合型层序组; (b) 前积式层序组及硅质碎屑三角洲沉积识别; (c) 退积式层序组

图6 斜坡沉积地层层序类型

Fig.6 Stratigraphic types of slope sequential deposits

积结构, 明显可见波形稳定、强振幅、高频、高连续性反射特征。

3.2.3 滑塌沉积地震相

晚中新世—上新世, 澳大利亚板块与班达弧发生碰撞^[22], 致使柔布克盆地内沉积地层达到了最大倾斜度且此时沉积速率最快。斜坡上滑塌沉积体 (ML1) 在地震剖面上可识别出丘状的外部反射形态(图4), 地震相表现为强振幅、弱连续性, 内部反射特征为杂乱反射结构。由于构造作用及重力流作用, 沉积物的稳定性和固结度较差, 导致沉积体上部发生滑塌, 下部受到挤压, 向上拱起形成丘状堆积厚层沉积。滑塌沉积的发育与陆源沉积物的充足供应以及晚中新世相对海平面的下降息息相关^[29]。频繁的海进海退事件导致沉积物失稳以及陆坡下的水动力条件增强, 从而使得研究区沉积物变得不稳定; 同时, 地层发生明显的加积和前积作用使得松散沉积物在一定坡度下发生海底失稳, 从

而形成滑塌现象^[33]。

4 斜坡沉积控制因素

中渐新世—晚中新世研究区构造活动微弱, 几乎没有断层发育, 斜坡沉积的发育主要受构造活动、古气候变化、海平面升降和沉积物供给的控制, 洋流作用也产生了一定影响。因此, 中渐新世以来, 柔布克盆地主要发育 Mandu 组和 Trealla 组厚层碳酸盐岩前积型斜坡沉积。中中新世由于气候由暖转寒, 降水增多, 海平面的上升使得等深流强度增大, 此时, 盆地在浅海—半深海环境下形成等深流沉积(图7)。此外, 在地震剖面上还可识别出滑塌、海底沟谷等受重力流侵蚀的沉积体系, 此时也有一定的物源, 有利于等深流沉积的保存。晚中新世以来(约 6 Ma), 班达岛弧与澳大利亚板块之间持续碰撞, 大规模的构造活动造成柔布克盆地局部发生构

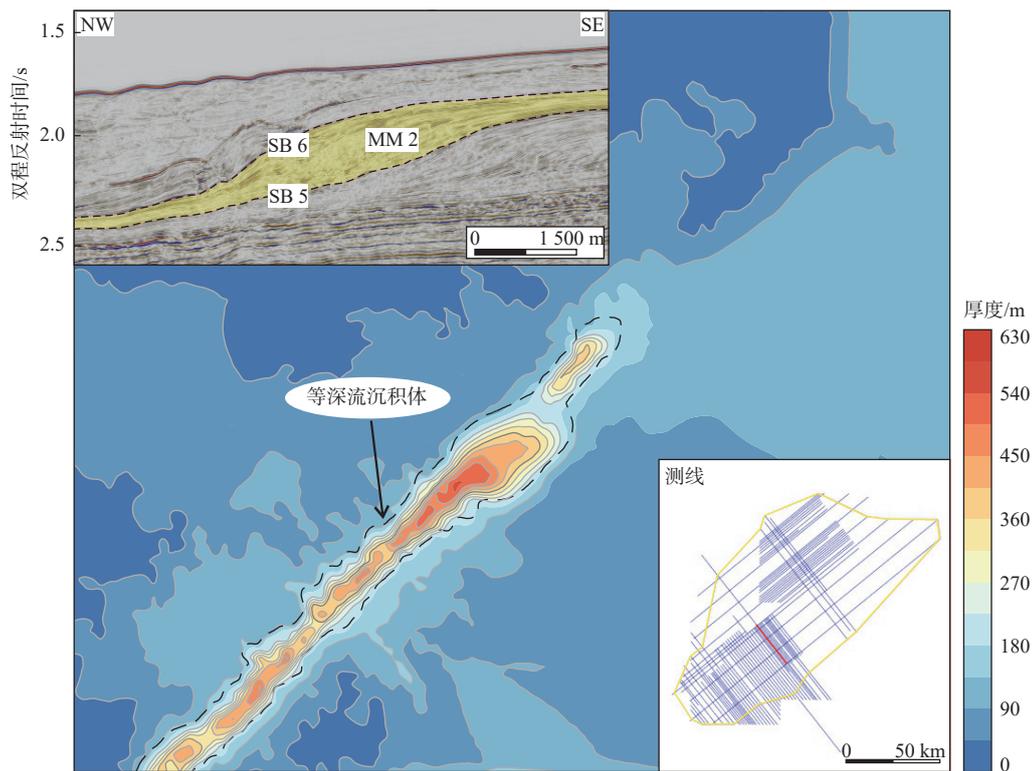


图 7 中中新世 (MM2) 沉积厚度

Fig.7 The thickness of the Middle Miocene deposits

造反转^[22,34]。因此,上中新统一上新统由构造作用所主导形成了厚层的碳酸盐岩斜坡沉积。

4.1 区域构造作用

新近纪以来,中新世晚期—上新世早期(约 10~6 Ma),向北移动的澳大利亚板块与班达岛弧发生碰撞(图 8),使得澳大利亚西北大陆架大部分地区经历了加速沉降^[5],此期间柔布克盆地内形成半深海—深海沉积环境。特别是在约 6 Ma 时,研究区 ML1 地层可观察到类似块体搬运沉积的杂乱地震反射结构,推测是研究区受构造活动的控制,使得陆坡具有较大的地形坡度导致陆坡沉积物失稳并形成重力流。重力流沿陆坡不断侵蚀下切从而形成了具有杂乱反射特征的滑塌块体沉积。根据大洋钻探 U1464 井的古水深和岩相资料显示,澳大利亚大陆西北部地势平坦,整个大陆边缘主要以厚层的台地碳酸盐岩沉积为特征。中新世中晚期柔布克盆地的区域构造作用逐渐增强,地震剖面上观察到不整合面的形成,部分区域的断裂重新开始活动^[5],以一系列小规模正断层活化为。活化的断裂控制了台地、地垒和地堑,使之与帝汶海槽南侧的地质特征一致。此外,上新世盆地沉积环境由

下伏陆架斜坡碳酸盐岩和硅质碎屑岩混合沉积逐渐转变为上覆半深海—深海沉积,地震剖面上可看出是以滑塌沉积体顶部的不整合面为界。

4.2 海平面相对变化

海平面的变化对斜坡沉积体系的发育有着重要影响。参考前人对柔布克盆地古海平面变化旋回进行恢复的结果^[16],其结果与 HAQ^[35]提出的全球海平面变化曲线大致吻合,与上述分析的地震响应也有较好的对应关系。由相对海平面变化旋回可知(图 9),中渐新世—上新世,柔布克盆地经历的 3 期海进海退旋回在时间上并不是对称分布的,进而造成斜坡沉积的沉积厚度、迁移长度、外部几何形态各不相同。多期的海平面升降导致盆地水深不断发生变化。高海平面时期,使得陆架被淹没,陆源沉积物主要堆积在滨岸或浅海地区^[36],地震剖面上识别出退积型沉积层序。低海平面时期,陆架大面积暴露,在沉积物输入过程中,斜坡会受到侵蚀作用^[37],从而导致前积斜坡沉积、海底沟谷等的形成。此时虽有沉积物供给,但受重力流的影响等深流沉积不易保存。此外,海平面的下降,使可容空间和坡角减小,导致斜坡沉积地层的前积层序向

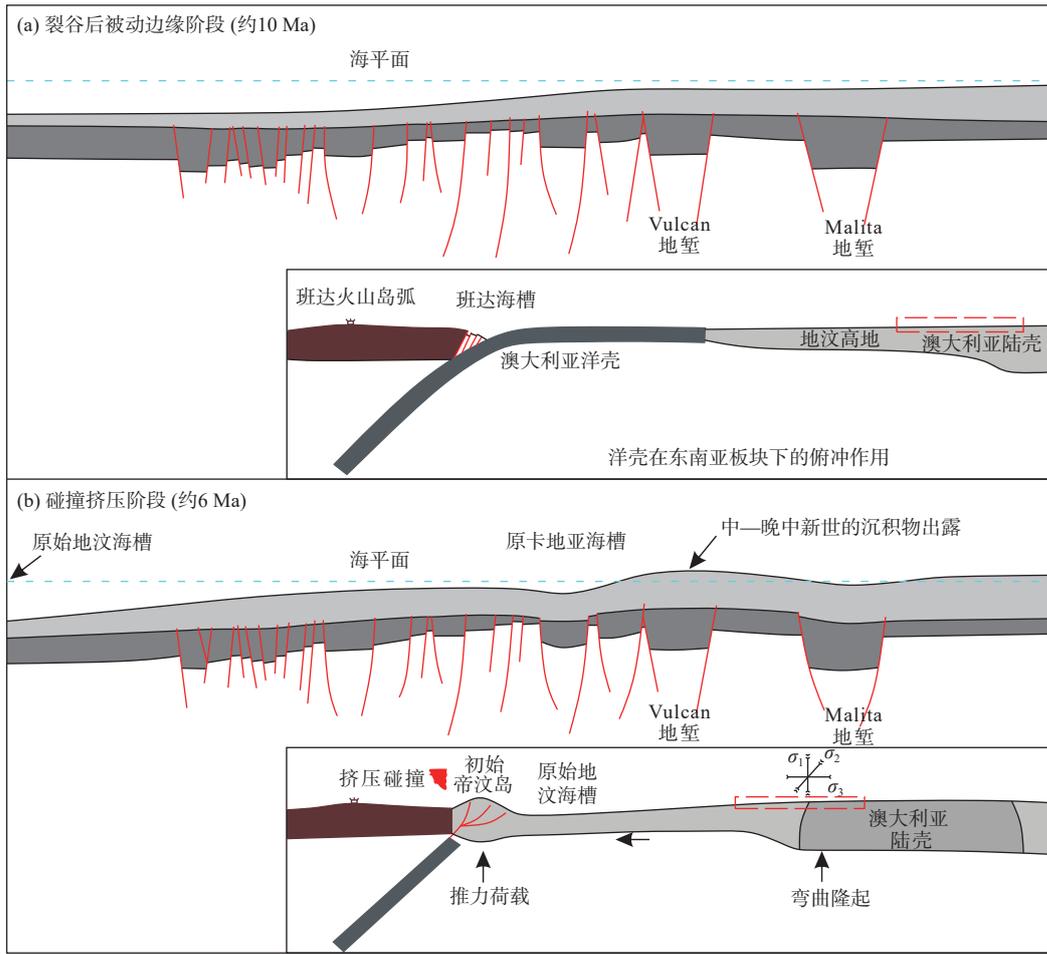
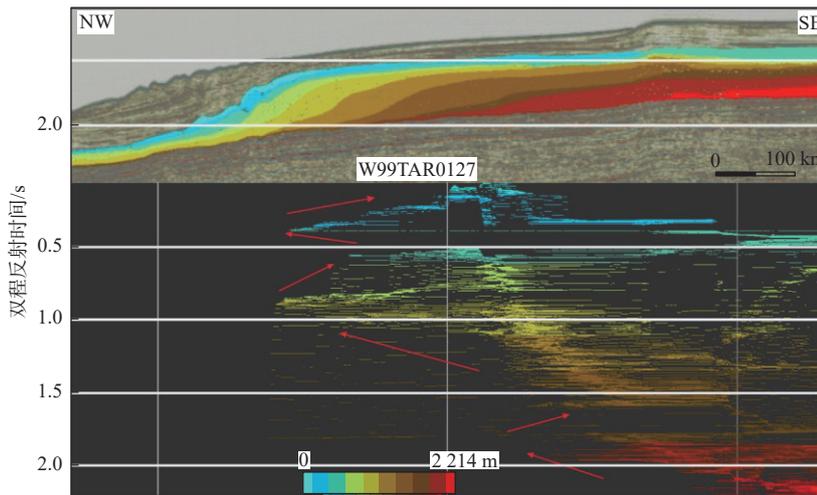


图 8 区域构造作用模式

Fig.8 The patterns of regional tectonic actions



引自文献 [15]

图 9 W99TAR0127 测线相对海平面旋回

Fig.9 Relative sea level cycle vs the W99TAR0127 survey line

进积层序演化, 从而致使陆源沉积物逐渐向盆地中心方向进积(图 6)。OL1 地层内, 楔形前积体之下席状外形前积体的发育, 说明中渐新世以前海平面

相对无明显变化, 盆地处于均一、低能的沉积环境。推测研究区斜坡沉积体系的发育和晚渐新世以来发生的海侵海退事件密切相关, 且低海平面时期有

利于陆坡海底沟谷发育,海平面相对上升时期有利于等深流沉积发育。

4.3 沉积物供给

斜坡沉积体系的发育离不开沉积物供给,大量陆源沉积物的输入会使斜坡沉积大规模发育。研究表明,在海平面下降期,沉积物沉积速率大于可容空间产生速率,沉积物以加积形式沉积在大陆架之上,形成较厚的加积层^[30]。沉积物被河流携带越过大陆架之后,沉积物以前积、进积方式堆积在陆坡上,从而沉积了较厚的沉积地层。在海平面上升期,可容空间产生速率大于沉积物的沉积速率,导致沉积物加积层变薄。受第3期海侵事件及物源供给的控制,斜坡沉积继续向西北方向延伸,但坡度减小,说明远离物源位置水动力条件逐渐减弱,盆地在上新世—第四纪回到海相沉积环境。

4.4 古气候变化

渐新世—中新世期间,澳大利亚盛行夏季季风^[38],干旱的古气候造成生物群落及植被减少,使得陆架大面积出露,大量的陆源碎屑物通过河流搬运越过宽阔的大陆架到达陆缘甚至陆坡区域。导致发生多期次的三角洲进积,从而造成 Bare 组硅质碎屑岩斜坡沉积的发育。中新世晚期是湿润期的开始,东南亚冬季季风增强,降水增多的同时,古气候发生干—湿转变^[5-6],使盆地发育稳定的海相碳酸盐沉积环境。

4.5 洋流运动

前人研究表明,洋流运动会造成不对称的漂移沉积、沉积楔或沉积物波,从而显著影响碳酸盐岩沉积的几何形状^[39],进而影响斜坡沉积外形的横向变化。Leeuwin 暖流是渐新世早期形成的中等强度海流,将温暖、低盐度的热带水从印度尼西亚沿澳大利亚西北和西部边缘向南输送,认为 Leeuwin 暖流是中中新世以前影响西北大陆架斜坡沉积发育的因素之一^[39]。中中新世气候最佳期后,N 向流动的西澳大利亚海流替换了 S 向流动的 Leeuwin 暖流,造成 NW 向进积占主导地位,形成了稳定的海相碳酸盐岩沉积。MM2 地层顶部被向西北推进的富含石英的硅质碎屑沉积物组成的陆架前积物充填,表明中中新世晚期以来盆地沉积还受到了印度洋东南部海洋环流重组作用的控制。

5 结论

(1)依据前人对柔布克盆地、北卡那封盆地综合地层以及前积型斜坡沉积的研究,以地震剖面上地震响应和3期海进海退事件为层序界面识别标志,划分了上渐新世—上中新世地层层序,识别出7个三级层序界面、6个三级层序。

(2)在地震剖面上,对位于斜坡沉积地层上的地震相单元进行识别,共识别出3种地震相,分别为前积型碳酸盐岩斜坡沉积、硅质碎屑三角洲沉积以及滑塌沉积地震相;外部几何形态主要为楔状、透镜状和丘状。

(3)探讨了控制不同类型的斜坡沉积发育的主要和次要因素。分析认为,中渐新世—晚中新世主要受到古气候变化、海平面变化、洋流作用和沉积物供给的控制,构造作用为次要控制因素。晚中新世—上新世,主要受区域构造作用与古气候变化的影响,海平面变化、洋流运动和沉积物供给为次要影响因素。

参考文献:

- [1] 蒋德鑫,张厚和,李春荣,等.全球深水-超深水油气勘探历程与发展趋势[J].海洋地质前沿,2022,38(10):1-12.
- [2] 温志新,王建君,王兆明,等.世界深水油气勘探形势分析与思考[J].石油勘探与开发,2023,50(5):924-936.
- [3] 张功成,屈红军,赵冲,等.全球深水油气勘探40年大发现及未来勘探前景[J].天然气地球科学,2017,28(10):1447-1477.
- [4] 王思琦,林畅松,邢玉忠,等.南海珠江口盆地晚渐新世陆架边缘斜坡带沉积演化及控制因素[J].地质论评,2023,69(S1):15-16.
- [5] KARATSOLIS B, VLEESCHOUWER D D, GROENEVELD J, et al. The Late Miocene to Early Pliocene "Humid Interval" on the NW Australian Shelf: disentangling climate forcing from regional basin evolution[J]. Paleoclimatology and Paleoclimatology, 2020, 35: 1-39.
- [6] TAGLIARO G, FULTHORPE C, GALLAGHER S, et al. Neogene siliciclastic deposition and climate variability on a carbonate margin: Australian Northwest Shelf[J]. Marine Geology, 2018, 403: 285-300.
- [7] 马本俊,秦志亮,吴时国,等.深水斜坡类型与沉积过程及其产物研究进展[J].沉积学报,2018,36(6):1075-1090.
- [8] 常吟善,杨香华,李丹,等.澳大利亚西北陆架三叠纪三角洲时空演化与物源体系[J].海洋地质与第四纪地质,2015,35(1):37-50.
- [9] 沈聘,谭秀成,李凌,等.川北早寒武世碳酸盐岩台缘斜坡沉积特征及变形构造形成机制探讨[J].古地理学报,2015,17(3):321-334.

- [10] 惠潇, 侯云超, 喻建, 等. 大型陆相拗陷湖盆深湖区前积型地震地层特征及砂体分布规律: 以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组中段为例 [J]. 沉积学报, 2022, 40(3): 787-800.
- [11] RAMON D C, RUDOLPH K W, EMMET P A, et al. Quantitative analysis of siliciclastic clinoforms: an example from the North Slope, Alaska[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 93: 127-134.
- [12] LEATHER D T, BAHADORI A, NWAHOA C, et al. A review of Australia's natural gas resources and their exploitation[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2013, 10: 68-88.
- [13] 康洪全, 逢林安, 贾怀存, 等. 澳大利亚西北陆架北卡那封盆地资源潜力评价 [J]. 石油实验地质, 2018, 40(6): 808-817.
- [14] 冯杨伟, 屈红军, 杨晨艺. 澳大利亚西北陆架油气成藏主控因素与勘探方向 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(6): 2259-2268.
- [15] 刘泽璇. 澳大利亚西北缘 Roebuck 盆地构造与沉积演化研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2021.
- [16] 刘聪. 澳大利亚北卡那封盆地地层特征及对海平面变化的响应 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- [17] 温志新, 王兆明, 胡湘瑜, 等. 澳大利亚西北大陆架被动大陆边缘盆地群大气田分布与主控因素 [J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(12): 41-47.
- [18] GURNIS M, KOMINZ M, GALLAGHER S J. Reversible subsidence on the North West Shelf of Australia[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020, 534: 1-30.
- [19] 牛杏, 杨香华, 李丹, 等. North Carnarvon 盆地三叠系沉积格局转换与烃源岩发育特征 [J]. 沉积学报, 2014, 32(6): 1188-1200.
- [20] 石浩程. 澳大利亚 Roebuck 盆地石油地质特征及勘探开发潜力 [D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2020.
- [21] 栾锡武. 东南亚构造分区 [J]. 地球科学进展, 2022, 37(3): 221-252.
- [22] 魏新元, 栾锡武, 孟凡顺, 等. 帝汶海槽构造与地震特征对深部板块的约束 [J]. 地球科学进展, 2022, 37(3): 277-289.
- [23] MOLYNEUX S, GOODALL J, MCGEE R, et al. Observations on the Lower Triassic petroleum prospectivity of the offshore Carnarvon and Roebuck basins[J]. The APPEA Journal, 2016, 56: 173-202.
- [24] 姜雄鹰, 傅志飞. 澳大利亚布劳恩斯盆地构造地质特征及勘探潜力 [J]. 石油天然气学报, 2010, 32(2): 54-57.
- [25] 李培培, 杨松岭, 刘志国, 等. 澳大利亚海上坎宁盆地油气地质特征及勘探潜力 [J]. 海洋地质前沿, 2018, 34(2): 46-52.
- [26] SMITH S A, TINGATE P R, GRIFFITHS C M, et al. The structural development and petroleum potential of the Roebuck Basin[J]. The APPEA Journal, 1999, 39(1): 364-385.
- [27] GOKTAS P, AUSTIN J A, Fulthorpe C S, et al. Morphologies and depositional/erosional controls on evolution of Pliocene-Pleistocene carbonate platforms: Northern Carnarvon Basin, Northwest Shelf of Australia[J]. Continental Shelf Research, 2016, 124: 63-82.
- [28] TESCH P, REECE R S, POPE M C, et al. Quantification of architectural variability and controls in an Upper Oligocene to Lower Miocene carbonate ramp, Browse Basin, Australia[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 91: 432-454.
- [29] SANCHEZ C M, FULTHORPE C S, STEEL R J. Miocene shelf-edge deltas and their impact on deep-water slope progradation and morphology, northwest shelf of Australia[J]. Basin Research, 2012, 24: 683-698.
- [30] PATRUNO S, HELLAND-HANSEN W. Clinoforms and clinoform systems: review and dynamic classification scheme for shorelines, subaqueous deltas, shelf edges and continental margins[J]. Earth-Science Reviews, 2018, 185: 202-233.
- [31] WALLACE M W, CONDILIS E, POWELL A, et al. Geological controls on sonic velocity in the Cenozoic carbonates of the northern Carnarvon Basin, North West Shelf, Western Australia[J]. The APPEA Journal, 2003, 43(1): 385-399.
- [32] MOSS G D, CATHRO D L, AUSTIN J A. Sequence biostratigraphy of prograding clinoforms, northern Carnarvon Basin, western Australia: a proxy for variations in Oligocene to Pliocene global sea level?[J]. Palaios, 2004, 19(3): 206-226.
- [33] 吴时国, 秦志亮, 王大伟, 等. 南海北部陆坡块体搬运沉积体系的地震响应与成因机制 [J]. 地球物理学报, 2011, 54(12): 3184-3195.
- [34] SAQAB M M, BOURGET J, TROTTER J, et al. New constraints on the timing of flexural deformation along the northern Australian margin: implications for arc-continent collision and the development of the Timor Trough[J]. Tectonophysics, 2017, 696: 14-36.
- [35] HAQ B U, HARDENBOL J A N, VAIL P R. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic[J]. Science, 1987, 235: 1156-1167.
- [36] PRÉLAT A, PANKHANIA S S, JACKSON C A, et al. Slope gradient and lithology as controls on the initiation of submarine slope gullies: insights from the North Carnarvon Basin, Offshore NW Australia[J]. Sedimentary Geology, 2015, 329: 12-17.
- [37] 邵珠福, 张文鑫, 毛毳, 等. 砂岩侵入体及其油气地质意义 [J]. 石油学报, 2021, 42(3): 378-398.
- [38] BETZLER C, EBERLI G P, LÜDMANN T, et al. Refinement of Miocene sea level and monsoon events from the sedimentary archive of the Maldives (Indian Ocean)[J]. Progress in Earth and Planetary Science, 2018, 5(1): 1-18.
- [39] GALLAGHER J S, WALLACE W M, LI L C, et al. Neogene history of the West Pacific Warm Pool, Kuroshio and Leeuwin currents[J]. Paleoclimatology, 2009, 24(1): 1-27.

Characteristics and the controlling factors of sedimentation in deep-sea slopes: an example of the Roebuck Basin, Australia

JIANG Lushan¹, LUAN Xiwu¹, LI Zuofu¹, XIAO Fei^{2*}, JIN Long¹, XUE Yang¹

(1 College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China)

Abstract: Understanding deep-water slope deposition is of great significance for deep-water oil and gas exploration and development as well as deep-water geohazard protection. To reveal the characteristics and controlling factors of the Neogene deep-water slope deposition in the Roebuck Basin, Australia, the stratigraphic sequences of slope deposition were delineated by using high-resolution 2D seismic data, and seven third-level sequence interfaces and six seismic sequences were recognized on seismic section. Results show that the Neogene in the study area are mainly the sedimentary sequences of progradational, aggradational-progradational, and retrogradational sedimentary sequences. The deep-water area of the Roebuck Basin developed three types of slope deposits: progradational carbonate rock deposits, siliceous debris deltaic deposits, and olistostrome deposits. The deep-water slope deposits were controlled by various factors. In the Middle Oligocene and the Late Miocene, the slope deposits were controlled by the relative sea level fluctuation, paleoclimate, and material supply, while after the Late Miocene, with the collision of the northward drifting Australian plate against the Banda Island Arc, the deep-water slope deposition was mainly controlled by tectonic activities.

Key words: deep-sea slope deposition; controlling factors; deep-water hydrocarbons; reflection seismology; Roebuck Basin