



巽他陆架东部新生代地震地层特征与沉积演化

王慧婷, 吴 南

Cenozoic seismic stratigraphic and sedimentary evolution of the Eastern Sunda Shelf

WANG Huiting and WU Nan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2025061202>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南黄海中部隆起晚新近纪—第四纪沉积序列的地层划分与沉积演化

Stratigraphic classification and sedimentary evolution of the late Neogene to Quaternary sequence on the Central Uplift of the South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 25–43

中国东部海域及相邻陆域综合地层分区及地层发育特征

Integrated stratigraphic regionalization of eastern China sea areas and adjacent land and their characteristics

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(2): 1–9

南海南部南盆地新生代以来构造–沉积演化特征及区域成藏模式

The tectono–sedimentary evolution characteristics and regional reservoir–forming model of Nan’ an Basin in the Cenozoic

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(4): 116–128

巽他陆架末次冰期植被之谜

The mystery of the Sunda shelf vegetation during the last glacial period

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 129–141

东海陆架盆地南部深部地层格架与油气资源潜力

Deep stratigraphic framework and hydrocarbon resource potential in the Southern East China Sea Shelf Basin

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(5): 158–171

末次盛冰期巽他陆架海平面和植被变化对陆表碳通量影响的数值模拟研究

Effects of Sunda Shelf exposure and vegetation changes on land–atmosphere carbon exchange during the Last Glacial Maximum

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(2): 110–118



关注微信公众号，获得更多资讯信息

王慧婷, 吴南. 巽他陆架东部新生代地震地层特征与沉积演化 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(4): 98-116.

WANG Huiting, WU Nan. Cenozoic seismic stratigraphic and sedimentary evolution of the Eastern Sunda Shelf[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2025, 45(4): 98-116.

巽他陆架东部新生代地震地层特征与沉积演化

王慧婷, 吴南

同济大学海洋地质全国重点实验室, 上海 200092

摘要: 巽他陆架是全球最大低纬陆架之一, 在连接亚洲大陆与赤道海洋系统、调控热带气候变化与物质输运过程中具有重要意义。其东部地区新生代地层保存较为完整, 系统地记录了陆相与海相沉积体系在垂向上的频繁交替充填过程, 是研究巽他陆架沉积演化与古环境变迁的重要载体。然而, 目前针对该区域的地震地层学研究仍较为薄弱, 导致对盆地内部地震地层特征与沉积演化过程尚不清晰。基于总长度约 12 000 km、覆盖面积约 80 000 km² 的高质量二维反射地震数据, 通过识别关键地质界面, 构建区域性地震地层格架, 开展地震相-沉积相综合分析, 从而揭示了新生代沉积充填与构造演化过程。自晚始新世至今, 研究区共识别出 8 个关键地震反射界面 (H0-海底) 与相应的 7 个地震地层单元 (SU1-SU7), 识别出分别代表陆相和海相的 10 种典型地震相 (SF1-SF10)。地震地层与地震相分析表明, 巽他陆架东部新生代充填演化历经了 4 个主要阶段: 晚始新世—早渐新世的断陷期 (SU1)、晚渐新世—早中新世的断拗期 (SU2)、早中新世—晚中新世的构造反转期 (SU3) 以及自晚中新世以来的区域沉降期 (SU4-SU7)。演化过程受到构造活动与海平面升降的双重控制: 单元 SU1-SU3 的形成主要受控于区域构造格局的转变, 经历了伸展断陷、稳定热沉降到挤压反转的演化过程, 沉积环境由陆地逐渐向浅海演变。而单元 SU4-SU7 的形成则与大规模海平面下降事件关系密切, 沉积环境由浅海—半深海逐步转变为河流、三角洲与浅海体系频繁交替发育的沉积格局。本研究建立的区域性地震地层格架, 揭示了巽他陆架东部沉积-构造充填演化历史, 为区域古气候重建和未来大洋钻探站位优选提供了来自反射地震的关键依据。

关键词: 地震地层格架; 沉积演化; 新生代地层; 巽他陆架

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2025061202

Cenozoic seismic stratigraphic and sedimentary evolution of the Eastern Sunda Shelf

WANG Huiting, WU Nan

State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: The Sunda Shelf, one of the world's largest low-latitude continental shelves, plays an important role in bridging the Asian continent and equatorial ocean systems, regulating tropical climate dynamics and sediment-mass transport. Its eastern region preserved exceptionally complete Cenozoic strata that systematically documented frequent vertical alternations between terrestrial and marine depositional systems. This succession formed a critical archive for investigating sedimentary evolution and paleo-environmental changes across the Sunda Shelf. However, the seismic stratigraphy of this region remains poorly constrained, resulting in poorly understanding of basin-internal seismic characteristics and depositional evolutionary processes. We adopted high-resolution 2D seismic reflection data (~12 000 km, 80 000 km²) to identify key stratigraphic interface, analyzed conduct seismic-to-sedimentary facies, and established the regional seismic stratigraphic framework, based on which the Cenozoic infill history and tectonic evolution were clarified. Eight major seismic horizons (H0-seabed), seven seismic stratigraphic units (SU1-SU7), and 10 typical seismic facies representing terrestrial and marine facies were identified from the Late Eocene to present. The analysis of seismic stratigraphy and seismic facies showed that the Eastern Sunda Shelf experienced four evolutionary phases: Syn-rift (SU1: Late Eocene-Early Oligocene), Post-rift (SU2: Late Oligocene-Early Miocene), Syn-inversion (SU3: Early-Late Miocene), and Post-inversion (SU4-SU7: Late Miocene-present). Deposition was jointly controlled by tectonics and eustasy: SU1-SU3 was controlled by regional tectonic transformation. The study area underwent an evolutionary process from rifting and faulting, stable thermal subsidence, to compressional transition. Meanwhile, the depositional environment transitioned from terrestrial to shallow marine. In contrast, the formation of SU4-SU7 was closely linked to an extensive sea-level fall event. Their depositional environment evolved from shallow-marine to bathyal sea into fluvial-

资助项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (22120250147)

作者简介: 王慧婷 (2002—), 女, 硕士研究生, 主要从事反射地震数据解释, E-mail: huitingwang@tongji.edu.cn

通讯作者: 吴南 (1990—), 男, 博士, 副教授, 主要从事地震地层学与深水沉积学研究, E-mail: nanwu@tongji.edu.cn

收稿日期: 2025-06-12; 改回日期: 2025-07-07. 周立君编辑

deltaic sedimentation. The established seismic stratigraphic framework resolved the depositional-tectonic evolution of the Eastern Sunda Shelf, and provided key constraints to the paleo-climate reconstruction and future site selection of international ocean drilling.

Key words: seismic stratigraphic framework; sedimentary evolution; Cenozoic strata; the Sunda Shelf

巽他陆架位于中国南海南部, 地处中南半岛、马来半岛和苏门答腊主岛、加里曼丹岛和爪哇群岛之间, 是世界上海洋低纬区最大的大陆架, 也是连接太平洋与印度洋的重要通道(图 1a)^[1-2]。巽他陆架因其独特的构造位置, 记录了新生代时期欧亚、印度-澳大利亚与太平洋-菲律宾三大板块多期碰撞与汇聚的构造过程, 为理解和重建区域乃至全球板块演化提供了关键的地质证据^[3-5]。同时, 自新生代以来, 巽他陆架沉积充填记录完整保留了冰期—间冰期旋回中海平面上升和下降的响应过程, 为揭示海平面波动机制与全球气候演变提供了关键视角与基础研究^[6-9]。

目前, 巽他陆架地震地层学研究多集中于纳土纳隆起以西区域, 例如泰国湾盆地、西纳土纳盆地和马来盆地, 已经搭建了较为统一的地震地层格架^[10-14]。这些工作不仅为该区域古环境重建和沉积演化过程提供了清晰的时空框架, 也为识别区域性不整合面、层序界面以及相对海平面变化提供了可靠依据^[15-16]。相比之下, 纳土纳隆起以东区域的地震地层学研究仍显薄弱。尽管前人在该区域开展了大量研究工作, 并在区域性不整合面识别(如早中新世不整合面、中中新世不整合面)以及单一沉

积盆地内的地震地层格架构建等方面取得了丰硕的成果(图 2a)^[13,17-21]。然而, 现有地震地层格架划分方案在区域尺度, 尤其是跨多个沉积盆地的研究中仍存在明显局限, 尚未形成统一的地震地层对比格架。其次, 受限于数据类型相对单一、可用地震资料数量有限且分辨率普遍较低, 尤其是前人使用的二维地震测线测网密度普遍不足(通常小于 100 km×100 km), 现有的地震地层划分方案多为局部适用, 缺乏统一的划分标准和跨区对比框架, 区域地层可对比性较差。这一问题在很大程度上制约了对该区沉积充填演化过程与构造响应机制的系统认知。因此, 亟需在纳土纳隆起以东海区开展系统的地震地层学研究, 建立区域性的等时性地震地层格架, 以厘清其构造-沉积演化机制, 为区域地质演化重建提供基础性支持和关键地质约束。

本文基于地震地层学方法, 以巽他陆架东部新生代沉积地层为研究对象, 利用高质量二维反射地震数据(总长度约 12 000 km, 覆盖面积约 80 000 km², 纵向分辨率深部约 20 m、浅部约 12~15 m; 图 1b), 通过识别地震数据中的不整合面及相应整合面, 划分层序地层单元, 建立等时性地震地层格架。同时, 借鉴并对比西部海域(如西纳土纳盆地、马来盆地等)

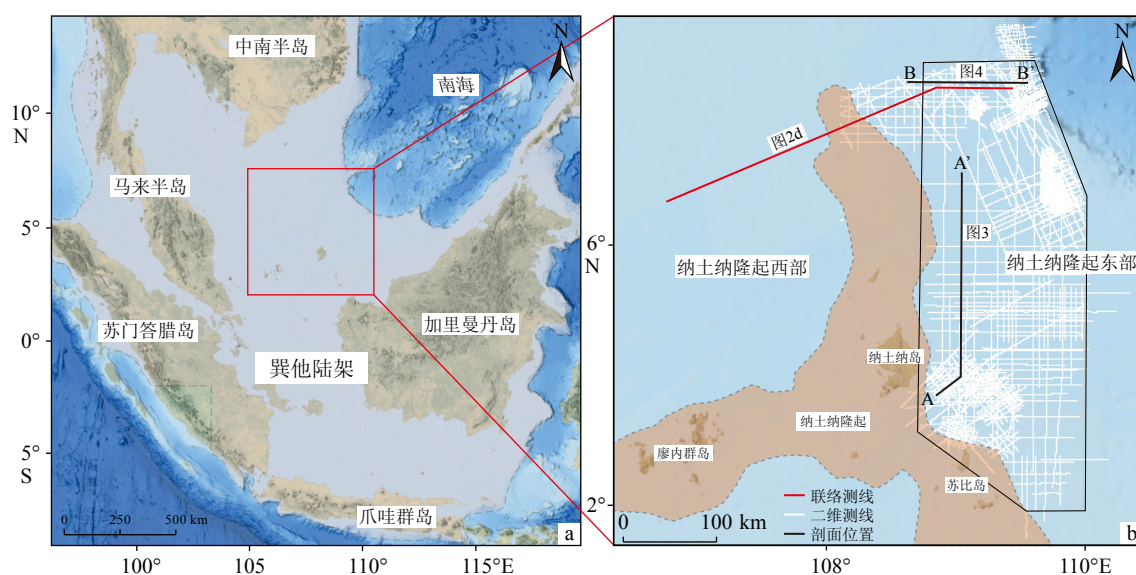


图 1 研究区地理位置及测线分布

a: 巽他陆架区域地理位置; b: 研究区主要构造单元分布及二维反射地震测线平面展布。

Fig.1 The location of the study area

a: Location of the Sunda Shelf; b: distribution of major structural elements and 2D reflection seismic lines in the study area.

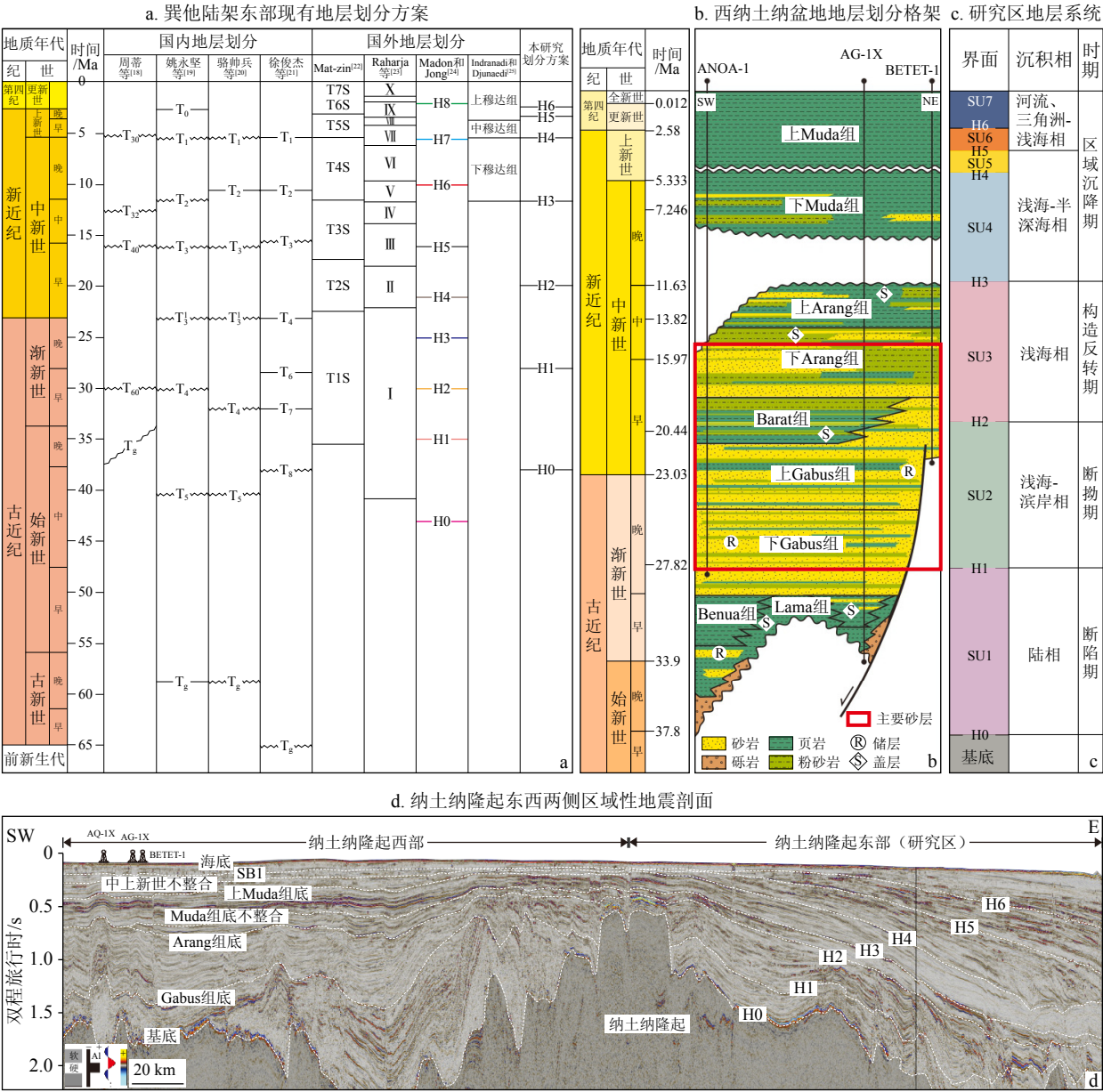


图 2 研究区新生界地层系统

a: 巽他陆架东部现有地震地层划分方案^[18-25]; b: 西纳土纳盆地地层划分格架^[14]; c: 本研究划分的地层系统;
d: 纳土纳隆起东西两侧区域性地震剖面。

Fig.2 The Cenozoic stratigraphic system of the study area

a: Existing seismic stratigraphic framework for the eastern Sunda Shelf^[18-25]; b: seismic framework of the West Natuna Basin from Surjono et al.^[14];
c: stratigraphic framework of this study; d: composite seismic sections on the eastern and western sides of the Natuna Arch.

已有的成熟地震地层划分成果,作为东部构造-沉积格局尚不清晰区域的对比参照框架,构建一套新生代以来的区域地震地层框架。在此基础上,通过分析各地震层序内部的地震相特征,并结合古地理演化背景与区域构造动力学条件,系统厘定各地震层序的沉积充填演化特征。最终,综合研究区地层充填历史,揭示巽他陆架东部充填演化对于构造活动和海平面变化的响应,旨在为未来巽他陆架的科学研究、大洋钻探站位优选以及油气资源勘探开发

提供可靠的地质依据与数据支撑。

1 区域地震地层格架

本研究选取两条具有代表性的区域性地震剖面,分别呈南北向与东西向展布,单条剖面长度均达数百千米,具备良好的区域覆盖能力与地层对比条件(剖面位置见图 1b)。在地震解释过程中,综合分析地震剖面的反射终止特征以及反射界面振幅、

连续性等地震反射属性,在研究区范围内系统识别出 8 个关键地震反射界面(H0-海底),并完成全区域的稳定追踪和闭合。这些界面在地震数据中表现为显著的不整合面或削截、上超、顶超反射终止界面,反映了区域内重要的构造转换和沉积环境变迁。在此基础上,本研究借鉴邻区西纳土纳盆地已建立的成熟地震地层划分方案(图 2b-c)^[14],在区域地震剖面中对关键地震反射界面进行跨区对比与追踪,实现了研究区地震反射层与西纳土纳盆地地震地层格架的有效对比与衔接。基于横跨纳土纳隆起东部和西部的区域性地震剖面,将本研究识别的关键地震反射界面与西纳土纳地震地层格架对比(图 2d,剖面位置见图 1b)。在上述基础上,综合西纳土纳盆地和曾母盆地、万安盆地、沙捞越盆地等已有地震地层学研究成果,对识别出的地震反射界面进行时代约束,初步厘定关键界面的地质时代,提高了地震界面纵向上划分、横向上对比的可靠性(图 2c)。

利用上述方法,研究区共识别出 8 个具有区域对比性的关键地震反射界面,分别为: H0(晚始新世,约 38 Ma)、H1(早渐新世,约 28 Ma)、H2(早中新世,约 20 Ma)、H3(晚中新世,约 11.6 Ma)、H4(早上新世,约 5.3 Ma)、H5(中—上新世,约 3.3 Ma)、H6(中更新世,约 2.5 Ma)以及现今海底界面。基于这些关键反射界面,将研究区新生代地层自老至新划分为 SU1-SU7 共 7 个地震地层单元,并建立了区域性的地震地层格架(图 3-4)。

2 典型地震相识别

本研究对各地层单元中的地震相进行系统分析,综合其外部形态与内部反射结构特征,共识别并划分出 10 种具有代表性的地震相类型(SF1-SF10)(图 5)。通过与邻区西纳土纳盆地及曾母盆地内部的地震相进行类比,进一步解释各类地震相所对应的沉积相类型,揭示研究区发育有陆相、滨浅海相及海相等多种沉积相,并识别出扇三角洲、碳酸盐台地、海底火山(包括火山丘和火山岩床)、水道和前积体等多种具有沉积环境指示意义的关键沉积单元^[13,26]。

3 关键地震反射界面特征

H0 界面对应西纳土纳盆地基底,可与沙捞越造山运动响应界面对应,古生物证据表明其年龄在晚

始新世(约 38 Ma)(图 2b-c)^[27-29]。H0 在研究区内广泛分布,构成新生代沉积序列(SU1-SU7)的底部界面^[30]。平面上,H0 整体构造格局表现为西部与中部较高、东部较低,盆地走向整体呈 NNE 向。H0 界面起伏强烈,发育 SN 走向的纳土纳隆起、NW-SE 走向的索康海槽和 NNE-SSW 走向的朋古兰海槽等多个次级构造单元(图 6a)。在地震剖面上,H0 通常表现为中等-强振幅、连续性中等-好的反射界面。在构造高区,该界面反射特征明显,呈现强振幅、中等-高连续性的反射特征;而在半地堑及海槽等埋深较大的区域,界面反射能量减弱,表现为中等振幅、断续反射,识别与追踪难度增加。H0 之下为基底地层,地震相表现为中弱振幅、低连续性至杂乱反射,向上以不整合接触被侵蚀至 H0 界面。H0 之上则发育连续性较好的楔状反射波组,地震相反射同相轴逐渐上超于该界面(图 3-4)。邻区测井资料显示,H0 界面处声波时差测井响应值明显增大,反映其岩性与上覆新生代沉积地层有显著差异,代表为一套花岗质侵入体构成的增生杂岩基底^[23,31]。

H1 界面对应西纳土纳盆地 Gabus 组底部界面,年龄大致为晚渐新世(约 28 Ma)(图 2b-c)^[14]。在平面分布上,H1 整体呈现西南部与西北部较高、东部较低的构造格局,盆地走向整体呈 NNE 方向。其主要构造单元特征与 H0 相似,但纳土纳隆起的空间展布范围略有扩大(图 6b)。在地震剖面上,H1 总体表现为中等-强振幅、中连续性的反射特征,H1 界面附近地层出现明显破碎和不连续现象,难以稳定追踪,形成弱-中等振幅、低连续性的角度削蚀不整合结构,指示该区域经历了纳土纳隆起的隆升与剥蚀作用(图 3)。始新世期间印度板块与欧亚板块发生碰撞,区域构造应力向东南方向传递,引发印支地块向南挤出,加里曼地块顺时针旋转,红河断裂带呈左旋走滑特征^[32-34]。在此区域构造背景控制下,巽他陆架东北缘处于走滑—伸展应力场中,发育一系列正断层控制的半地堑构造体系(图 3-4)^[35-36]。

H2 在西纳土纳盆地对应于 Arang 组底部界面,界面年龄大致为早中新世(约 20 Ma)(图 2b-c)^[37]。平面上,H2 界面构造起伏整体趋于平缓,地势由西部和南部隆起区向东北和东部逐渐降低,盆地走向整体呈 NNE 方向,纳土纳隆起的空间展布范围进一步扩大(图 6c)。在地震剖面上,H2 表现为强振幅、高连续性的反射特征,界面上下整体为连续沉积,未见明显的区域性不整合。尽管 H2 不具备显

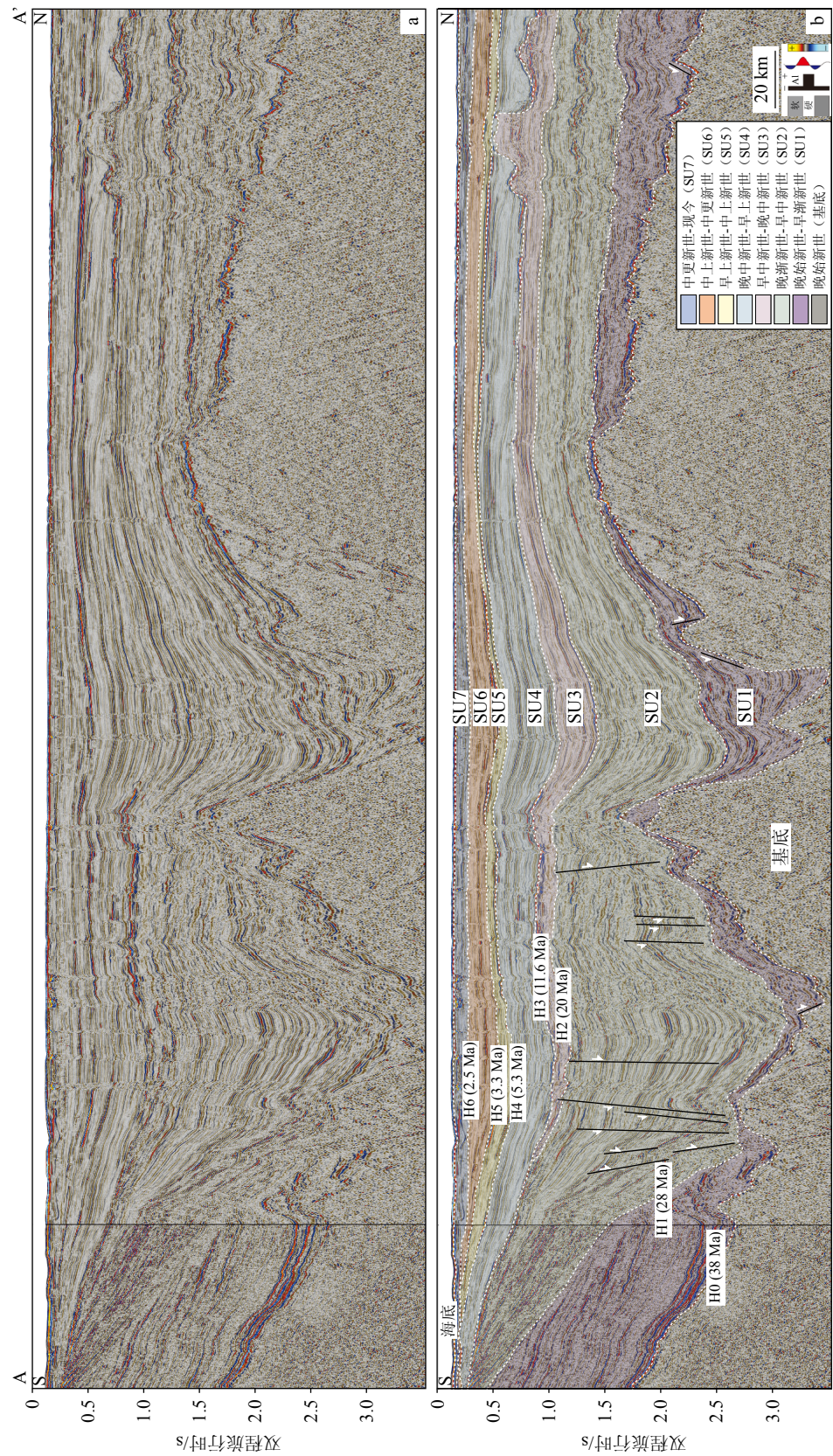


图 3 研究区南北向区域地震剖面与解释
Fig.3 Regional N-S seismic profiles of the study area and interpretation

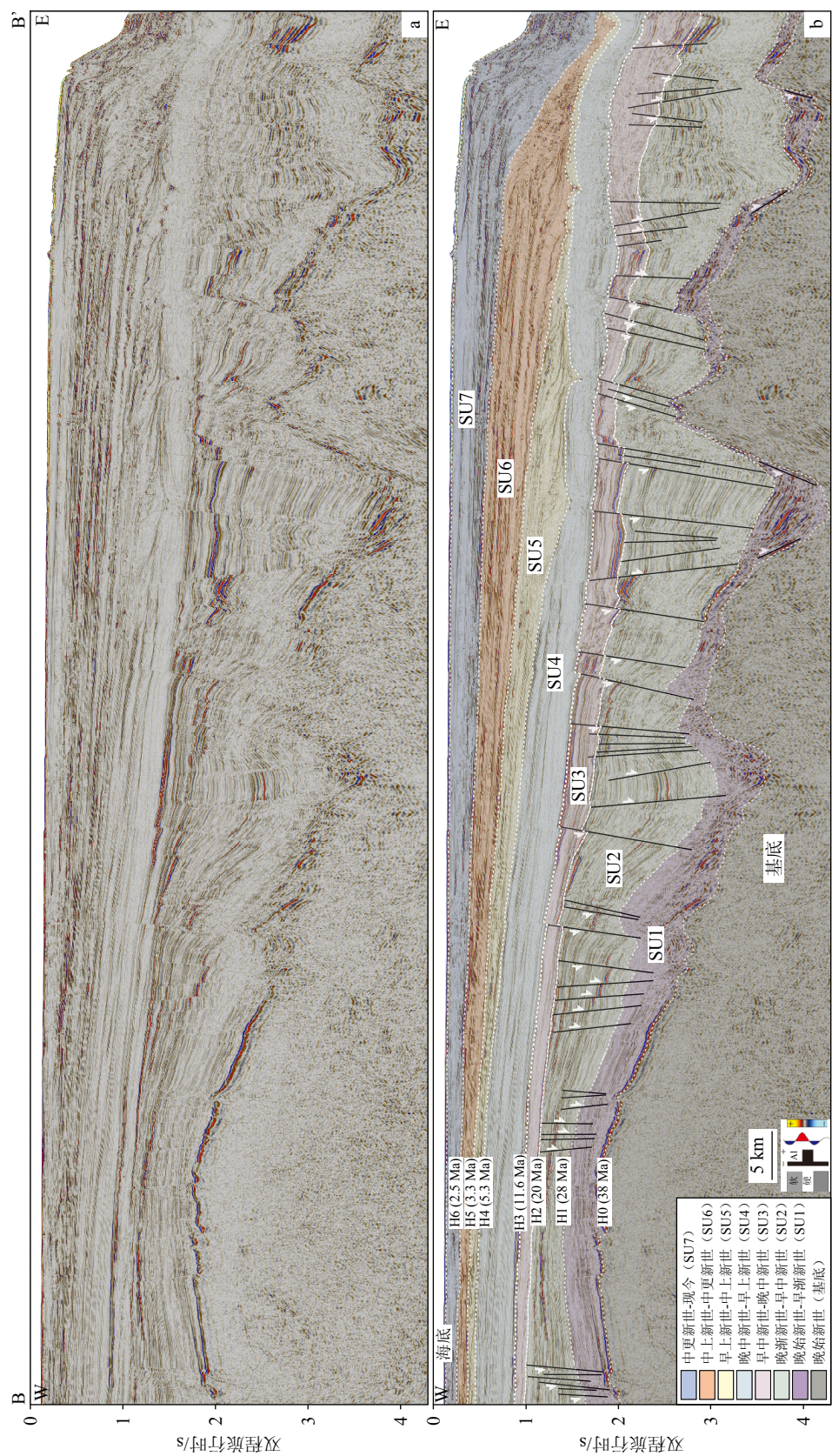


图 4 研究区东西向区域地震剖面与解释
Fig.4 Regional E-W seismic profiles of the study area and the interpretation

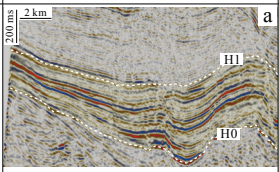
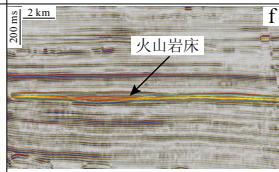
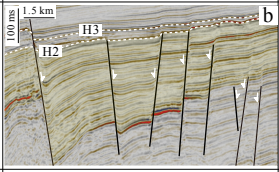
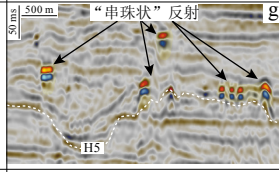
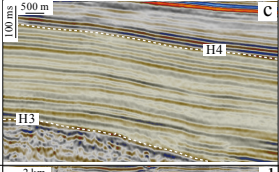
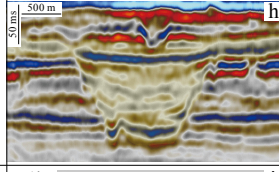
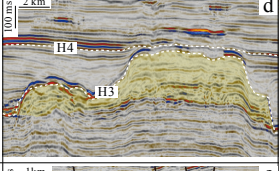
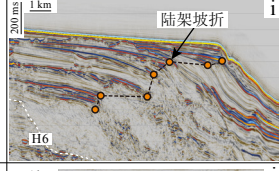
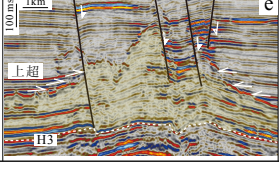
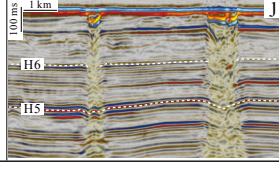
地震相	外部形态	内部反射特征	地震剖面	解释	地震相	外部形态	内部反射特征	地震剖面	解释
SF1	楔状	中-强振幅、中-高连续、发散反射		扇三角洲	SF6	透镜状	强振幅、高连续、平行反射		火山岩床
SF2	发散状	中等振幅夹强震幅、中-高连续、平行-亚平行反射；内部发育系列高角度正断层		浅海—滨岸沉积	SF7	串珠状	强振幅、低连续、断续反射		纵向流体通道
SF3	席状	中-弱振幅、高连续、平行-亚平行反射		半深水—深水沉积	SF8	充填状	底部强振幅；内部中-强振幅、中-低连续、平行-亚平行反射		水道
SF4	丘状	顶底部强振幅、高连续性反射；内部中-强振幅、中等连续、亚平行反射；		碳酸盐台地	SF9	楔状	顶积层强振幅、高连续；前积层中等振幅、中-高连续；底积层弱振幅、低连续；S型前积反射		前积体
SF5	丘状	顶底强振幅；内部中-弱振幅中-低连续、杂乱反射；侧翼发散反射，与围岩上超不整合接触		火山丘	SF10	柱状、锥状	顶部强振幅异常；内部弱振幅、低连续、空白或杂乱反射		流体逸散管道

图 5 典型地震相
Fig.5 Seismic facies template

著的区域性不整合特征,但界面下方的反射组由下至上逐渐由楔状结构过渡为平行状,在局部位置可见轻微的顶超现象,界面上方则可见下伏地层向其上超终止,反映出伸展构造静稳期的结束及轻微挤压构造活动的开始(图 3)^[38]。

H3 是本区最具识别度的区域性不整合面,年龄大致为晚中新世初(约 11.6 Ma),对于区域构造演化具有重要意义^[14,39]。H3 在巽他陆架西部和东部多个盆地均被识别,对应西纳土纳盆地的 Muda 组底部不整合(Base Muda Unconformity, 又称 Muda 不整合)或晚中新世不整合(Late Miocene Unconformity, LMU)(图 2b-c)^[11,14,37,40-41]。在曾母盆地亦称中中新世不整合(Middle Miocene Unconformity, MMU)、南海不整合(South China Sea Unconformity, SCSU),可与万安盆地 T2 对比(图 2a)^[19,29]。平面上, H3 界面总体构造形态表现为西南高、东北低(图 6d),盆地走向由 NNE 转为 NNW。在地震剖面上, H3 整体表现为强振幅、中等-高连续性的反射特征。H3 在西南部隆起区地层呈现明显不整合关系,上覆发育连

续席状反射组,而其下的地层则被强烈削截,遭受轻微挤压局部形成褶皱,显示出典型的削截不整合结构(图 7a)。H3 在东部和北部则表现为与西部不整合对应的整合,伸展期发育的正断层体系几乎都终止于该界面,界面之上缺乏明显的构造扰动和重大不整合。界面上下地层单元地震反射特征差异显著,上覆席状平行反射波组和 S 状前积反射波组下超至界面之上,且较下伏地层振幅明显减弱、连续性增强(图 7b)。上述特征表明,在 H3 界面发生了构造-沉积体系的显著转变。该构造转变受控于新生代板块构造运动。约 25 Ma 时,澳大利亚板块与菲律宾板块发生碰撞,推动菲律宾板块沿北西方向运动,进而诱发加里曼丹岛的逆时针旋转^[20,33,42-44]。板块边界应力约在 20 Ma 传递至研究区,诱发构造反转,区域整体受挤压控制。挤压应力促使纳土纳隆起强烈抬升,并于中新世中-晚期达到构造隆升高峰,导致该区域上覆地层遭受显著剥蚀,西部隆起区发生削截,形成区域性不整合界面 H3^[25]。相比之下,盆地内部应力释放较为缓和,仅发育小规模

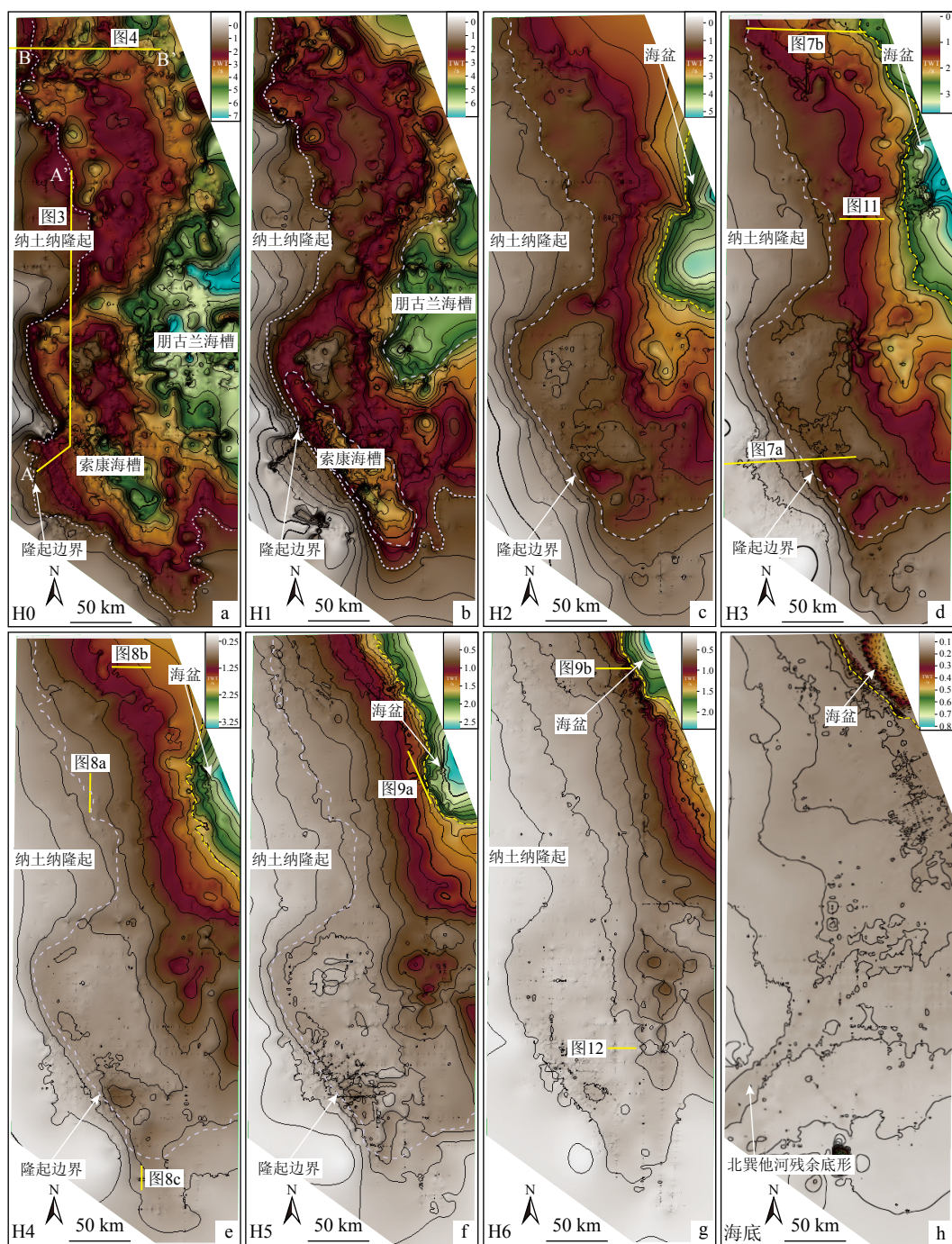


图 6 关键地震反射界面 (H0-海底) 构造图

Fig.6 Depth structure of key seismic horizons (H0-seabed)

的褶皱构造与断层反转^[45]。综上, H3 代表一次受控于弱挤压构造反转作用的区域性隆升不整合, 表现为西部高角度削蚀、东部整合的空间变化格局, 标志着中新世晚期构造反转作用的终止以及后续构造稳定期的开始。

H4 对应西纳土纳盆地上 Muda 组底部界面, 年龄大致为早上新世 (约 5.3 Ma) (图 2b-c)^[14]。在曾母盆地可与 T1 对比, 在沙捞越盆地可与 T5S 层序底部界面^[22]、H7^[13,24] 对比 (图 2a)。平面上, H4 总体构造

形态表现为西南高、东北低, 起伏程度进一步减弱, 纳土纳隆起边缘构造特征减弱。盆地走向由此前的 NNW 转为 NW, 海盆逐渐向北推进 (图 6e)。在地震剖面上, H4 界面表现为中等-强振幅、高连续性的反射特征, 代表区域碳酸盐台地和生物礁被逐渐淹没、最终衰退的界面 (图 8a)。在盆地北部陆坡区域, H4 之上发育楔状前积体, 其同相轴自上向下逐渐下超至界面, 指示前积过程 (图 8b); 而在南部隆起带边缘, H4 界面呈“U”型或碗状下切特征 (宽

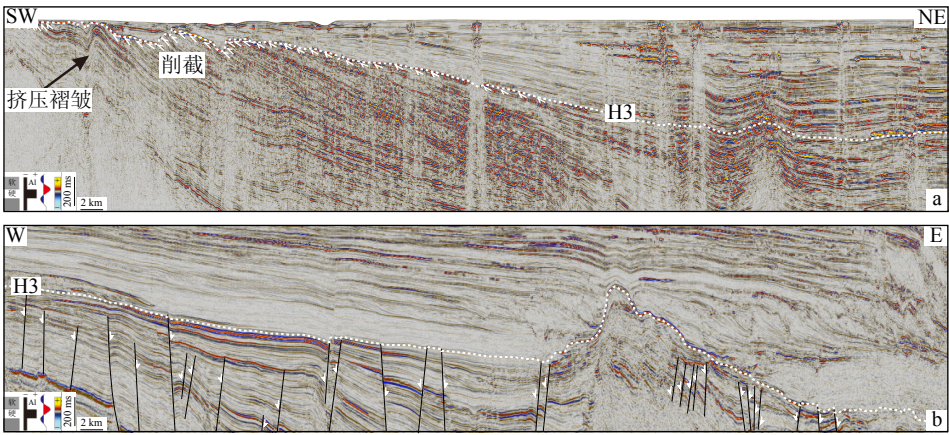


图 7 H3 界面反射地震特征

a: 研究区南部 NE-SW 向地震剖面, 显示地震反射界面 H3 在西南部隆起区呈削截不整合特征, 向东北方向逐渐过渡为整合接触特征; b: 研究区北部东西向地震剖面, 地震反射界面 H3 在北部呈整合接触特征, 正断层体系普遍止于该界面之下, 界面以上未见明显构造扰动或重大不整合现象。剖面位置见图 6d。

Fig.7 The seismic reflection characteristics of H3

a: The NE-SW seismic profile in the southern study area, showing the truncation unconformity in the southwest uplift area and gradual transition to conformity northeastward; b: the E-W seismic profile in the northern study area depicting conformity; normal faulting terminates below H3, with minimal structural disturbance or significant unconformities above. The location is shown in Fig.6d

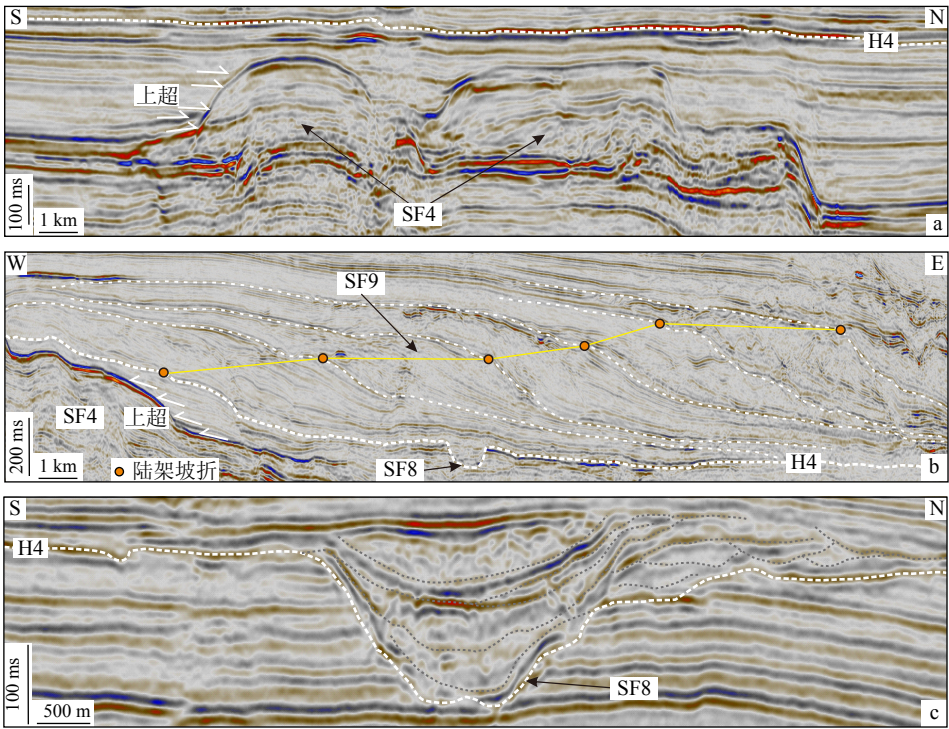


图 8 H4 界面反射地震特征

a: 研究区北部南北向地震剖面, 显示 H4 反射界面以下普遍发育碳酸盐岩台地, H4 界面代表该台地最终被淹没的顶部界面; b: 研究区北部陆坡区域东西向地震剖面, 显示 H4 反射界面上部发育多期次前积体地震反射结构。图中橙色圆点标示各单期前积体的陆架坡折点, 黄色实线连接多期坡折点, 指示其整体迁移路径; c: 研究区南部隆起带南北向地震剖面, 显示 H4 反射界面呈“U”型或碗状下切特征。位置见图 6e。

Fig.8 The seismic reflection characteristics of H4

a: The N-S seismic profile in the northern study area showing extensive carbonate platform developed below the H4. H4 marks the final drowning surface of this platform; b: the E-W seismic profile across the northern continental slope displaying multiple progradational clinoform packages above H4. Orange dots mark individual shelf break points; yellow line traces the overall migration trajectory; c: the N-S seismic profile of the southern uplift area showing U-shaped or bowl-shaped incision at surface H4. The location is shown in Fig.6e

度可达 2 km, 下切深度约 200 m) 与早上新世约 5.3 Ma 全球海平面显著下降事件相对应(图 8c)^[22,46]。

H5 对应于西纳土纳盆地上 Muda 组的中—上新世不整合, 年龄大致为中上新世(约 3.3 Ma)(图 2b-c)。平面上, 界面西南高、东北低, 构造特征与 H4 相似, 但海盆进一步向北推进(图 6f)。地震剖面上, H5 总体表现为中等—强振幅, 连续性好的反射。在北部陆坡区, H5 界面在沿陆坡走向的剖面呈典型“U”型下切结构, 是一系列宽达 3 km、深达约 600 m 的大尺度水道下切底界面(图 9a)。反映出中—上新世区域性海平面的快速下降, 河流基准面降低, 发生区域性的下切, 且在盆地边缘陆坡带下切规模达到最大^[11,47]。综上, H5 界面是区域海平面显著下降作用下形成的关键地震层位界面。

H6 对应西纳土纳盆地第四纪陆相河道层序的底界面 SB1, 年龄大致为中更新世(约 2.5 Ma)^[48]。在平面上, 界面地势在东北部海盆区域地势陡降, 其余区域相对平缓, 纳土纳隆起边缘构造特征不再明显。海盆更进一步向北拓展, 东北部为主要的负向地形中心(图 6g)。剖面上, H6 界面总体表现为强振幅、高连续性的反射特征, 是北部陆坡一系列小规模“V”型或“U”型水道下切(宽约 1 km, 深约几十米)的底界面, 与西纳土纳盆地 SB1 表现为系列水道下切不整合面特征类似。在 H6 界面之上, 广泛发育水道系统、下切峡谷和三角洲前积体系(图 9b)。河道与大规模下切谷的发育, 可能与中更新世约 2.5 Ma 期间一次显著的冰期事件有关。该

事件引发全球海平面剧烈下降至距现今 60 m 以下, 巽他陆架大范围出露, 促使河道体系发生深切作用, 形成大规模下切地貌^[49-51]。此后, 海平面进入周期性升降的旋回阶段, 控制了沉积体系的演化与叠置特征^[49]。现代海底地形整体较为平坦, 自西南向东北逐渐降低。前人研究表明, 在纳土纳岛东南侧发育一条 NE-SW 向狭长的中央河谷, 河谷宽度达 10~30 km, 下切深度可达 40 m, 被认为是古巽他河在现代海底遗留下的残余底形, 记录了更新世晚期海平面下降时期古河流系统的发育特征(图 6h)^[52]。

4 地震地层单元

4.1 SU1 (晚始新世—早渐新世, 约 38~28 Ma)

地震地层单元 SU1 的底部界面为 H0, 顶部界面为 H1, 时代为晚始新世至早渐新世(约 38~28 Ma)(图 2c, 图 3-4)。地震剖面上, SU1 整体表现不规则状、由多个楔状反射体组合而成, 以强振幅、中等连续、发散反射特征为主, 与下伏基底不整合接触。厚度横向上变化大, 向断层一侧增厚(图 3-4)。SU1 负向地形空间内和缓坡上主要发育地震相 SF1, 地势相对高、较为平缓区则以 SF3 为主, 反映出不同构造位置对沉积相组合的控制作用(图 5a-b)。在平面分布上, SU1 厚度变化显著, 主要沉积中心位于西南部及东南部, 且普遍靠近断层

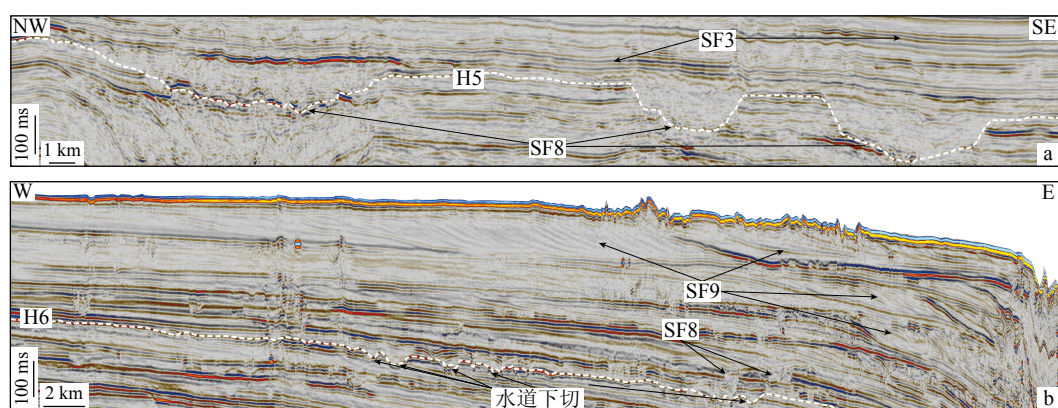


图 9 H5 和 H6 界面反射地震特征

- a: 研究区北部陆坡 NW-SE 向地震剖面, H5 界面发育一系列“U”型的大尺度水道下切特征, 反映出强烈侵蚀作用下形成的深切水道系统;
b: 研究区北部陆坡区域东西向地震剖面, H6 界面发育小规模“V”型或“U”型水道下切特征, 指示该时期存在水道侵蚀与沉积活动。

位置见图 6f-g。

Fig.9 The seismic reflection characteristics of H5 and H6

- a: The NW-SE seismic profile across the northern slope. Surface H5: showing developed large-scale U-shaped channel incisions, indicating intense fluvial erosion; b: the E-W seismic profile on the northern slope. Surface H6: showing developed smaller-scale V-shaped and U-shaped channel incisions, indicating active channel erosion and deposition. The location is shown in Fig.6f-g.

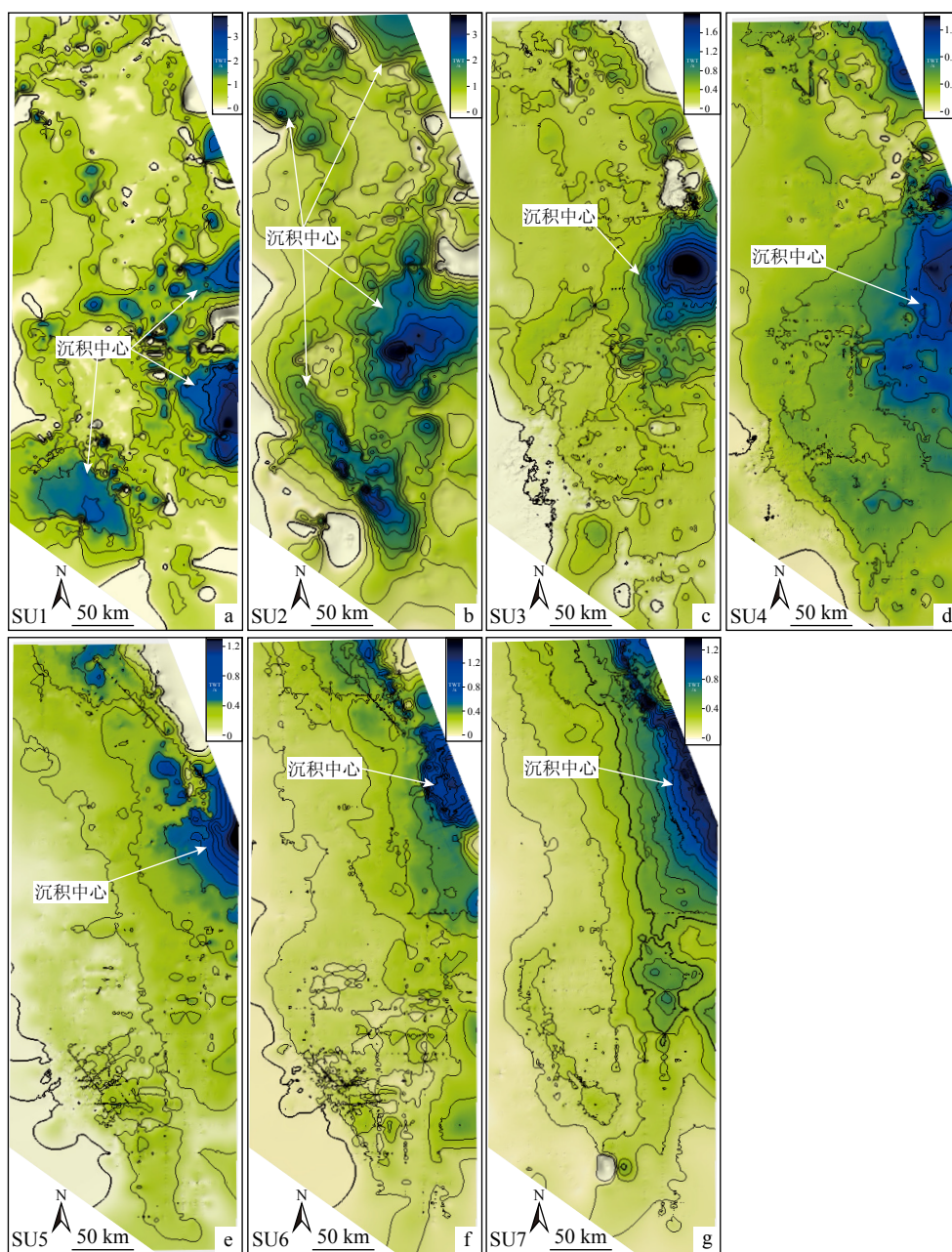


图 10 地震地层单元 (SU1-SU7) 厚度图

Fig.10 Isopach map of the seismic-units SU1-SU7

一侧分布,表现出明显的厚度突变特征(图 10a)。

SU1 整体上不规则的几何形态和横向厚度的显著变化,反映了强烈的构造活动。其局部多发育的楔状几何形态、向断层增厚的特征以及反射层组发散结构、向断层的上超终止,指示了盆地差异沉降,是典型的同沉积断层活动证据。这表明在晚始新世至早渐新世期间,研究区受走滑-伸展应力场控制,发育了一系列以正断层主导的不对称半地堑构造体系,沉积充填过程主要受强烈的断陷作用控制,处于典型的断陷期(图 3-4)^[5,53-54]。这一特征与西纳土纳盆地内同期发育的地震地层单元相似,后

者亦表现出明显的断层控制下的楔状沉积体和厚度突变特征,反映两区在区域构造背景上的一致性^[23,37]。地震相 SF1 常见于物源供给充足条件下,沉积物在断陷形成的陡坡带一侧快速堆积,形成扇体沉积。而地震相 SF3 则指示了低能、静水环境下的缓慢沉积过程。结合晚始新世至早渐新世期间巽他陆架大部分地区处于陆地环境、以河流输入为主并广泛发育大型淡水湖泊的古地理背景^[55],可推断该时期西南部和东南部邻近陆源区(纳土纳隆起和婆罗洲),大量碎屑物质由河流输送至半地堑及陆架边缘。在活跃的断陷作用控制下,沉积物倾向

于在沉降速率最大、靠近断层一侧快速堆积, 形成沉积中心, 主要表现为扇三角洲沉积特征(即地震相 SF1)^[56]。而在北部远离断层边界区域(如半地堑的轴部或缓坡带), 沉降速率较低, 环境为湖泊、沼泽等静水环境, 有利于厚层均质沉积物的沉积, 对应于地震相 SF3^[57-58]。

因此, 地震地层单元 SU1 为断陷期沉积。与邻区西纳土纳及曾母盆地相似, 该时期沉积体系受强烈断裂活动控制, 主要发育于河流—三角洲及湖泊等陆地沉积环境(图 2c)。研究区南部和东南部邻近陆源区, 主要发育扇三角洲沉积体系, 为沉积中心所在; 而北部远离断层边界, 以湖泊、沼泽等静水环境为主, 沉积以均质沉积物为特征。

4.2 SU2 (晚渐新世—早中新世, 约 28~20 Ma)

地震地层单元 SU2 底部界面为 H1, 顶部界面为 H2, 时代为晚渐新世至早中新世(约 28~20 Ma)(图 2c, 图 3-4)。在地震剖面上, SU2 整体表现为底部不规则、但顶部大致水平的楔状反射体, 整体向上过渡为中等—强振幅、中等—高连续、平行至缓倾斜的反射层组, 在盆地边缘的隆起带, 普遍发育明显的上超反射终止关系, 其余区域则表现为与下伏地层单元整合接触。其厚度在地堑、半地堑等负向地形区较大, 向隆起区均匀减薄, 反映先存地形对沉积趋势的影响(图 3-4)。SU2 内部以地震相 SF2 为主(图 5b), 同时在局部构造低洼区和海槽区域亦可见 SF4、SF5 等次要地震相的发育(图 5d-e)。从平面分布来看, 相较于断陷期的 SU1, SU2 地层厚度显著增加(局部可达约 5000 m), 且空间分布更趋均匀, 主要的沉积中心位于中部的两条主海槽以及北部半地堑的低洼区域(图 10b)。

SU2 剖面几何形态、内部反射过渡趋势和平面厚度变化显示, 该时期断裂伸展活动显著减弱。尽管 SU2 单元内部虽发育多条高角度正断层, 但这些断层断距较小, 未对同期沉积厚度分布产生明显控制, 也表明构造活动已不再是沉积的主要控制因素, 区域进入相对构造静稳阶段。在热沉降与缓慢区域性拗陷过程控制下, 沉积物逐步填平并覆盖了早期半地堑地形, 沉积中心由靠近断层的边缘区域逐渐向盆地中央迁移, 沉积范围显著扩大。该单元内部以 SF2 地震相为主, 常反映浅海至滨岸等相对稳定、低能量水动力环境下不同粒度沉积物垂向组合的广泛发育^[13,18]。基于上述特征, 伴随盆地沉降加剧及全球海平面上升, 沉积环境由早期的河流—三角洲体系逐步向浅海—滨岸系统过渡, 原断陷期

形成的陆相沉积广泛被滨浅海沉积所覆盖, 地势低洼区成为沉积物主要汇聚中心^[13,24]。因此, 地震地层单元 SU2 代表断拗期沉积^[59]。与邻区西纳土纳及曾母盆地相似, 该时期构造活动微弱, 区域以热沉降和缓慢拗陷为主要特征, 在持续海侵背景下广泛发育浅海至滨岸相沉积(图 2c)。

4.3 SU3 (早中新世—晚中新世, 约 20~11.6 Ma)

地震地层单元 SU3 底部界面为 H2, 顶部界面为 H3, 时代为早中新世至晚中新世(约 20~11.6 Ma)(图 2c, 图 3-4)。地震剖面显示为席状反射体, 厚度向隆起带缓慢减薄。内部以中等—强振幅、中等—高连续、平行—亚平行反射特征为主(图 3-4)。单元内部发育多种类型地震相, 在南部靠近隆起带区域, 局部发育地震相 SF1(图 5a), 在北部陆架区则广泛分布地震相 SF4(图 5d), 中部和东部以地震相 SF2 为主(图 5b)。在平面分布上, 该时期沉积物厚度整体较薄, 沉积范围相对有限, 沉积中心较前期进一步收缩, 并向东北至东部方向迁移(图 10c)。

隆起边缘带上超反射终止关系表明, 该时期可容空间增长速率远小于沉积物供给速率(图 3)。同时, SU3 主要表现为区域性隆升与构造倾斜, 反映出该阶段区域应力场由伸展向水平挤压的转变, 但未形成西纳土纳盆地所见的大规模褶皱山系(图 3)^[45,60]。其中, 地震相 SF4 为碳酸盐台地和生物礁的典型响应特征, 通常指示浅海沉积环境(图 8a)。在早中新世(约 20 Ma), 巽他陆架发生了一次区域性海侵, 沉积环境整体转变为浅海相, 东南部的加里曼丹岛成为主要碎屑物源区^[32]。研究区在靠近陆源的近岸区域, 发育滨浅海相沉积(SF2), 而在北部广阔的陆架区, 因远离主要物源, 碎屑供给有限, 形成大规模碳酸盐台地与生物礁沉积(SF4)。靠近隆起带的区域受持续的区域性隆升影响, 盆地可容空间增长减缓, 甚至局部减小, 发育来自隆起剥蚀物的碎屑沉积(SF1)^[61-62]。

因此, 地震地层单元 SU3 形成于构造反转期。该阶段显著受控于区域挤压隆升作用, 与邻区曾母盆地类似, 浅海相为主要的沉积背景(图 2c)。同时, 沉积体系分异明显: 隆起带以剥蚀碎屑沉积为主, 中部与东部边缘近源区发育滨浅海相沉积, 而北部远源区则为碳酸盐台地与生物礁的有利发育区。

4.4 SU4 (晚中新世—早上新世, 约 11.6~5.3 Ma)

地震地层单元 SU4 的底部界面为 H3, 顶部界面为 H4, 对应西纳土纳盆地下 Muda 组沉积, 时代

为晚中新世至早上新世(约 11.6~5.3 Ma)(图 2b-c, 图 3-4)。地震剖面显示,地层单元 SU4 整体表现为席状反射体,厚度横向稳定。内部以中等-强振幅、高连续、平行-亚平行反射特征为主。在隆起区与下伏地层单元 SU3 呈角度不整合接触,其余区域表现为整合接触(图 3-4)。其内部主要发育 SF3 地震相(图 5c),盆地西南部及近岸斜坡带局部发育地震相 SF5(图 5e),在东北部局部地势较高区域发育地震相 SF6(图 5f)。在平面分布上, SU4 地层单元厚度相对均一,整体向东部逐渐增厚,主要沉积中心位于北东东和东北部区域(图 10d)。

SU4 整体厚度的均一性和内部地震反射特征整体表现出良好的反射连续性,表明该时期构造活动微弱,区域演化趋势以构造静稳与缓慢沉降为主。在盆地边缘的隆起带,地震同相轴逐渐向上超覆至 H3 界面之上。在北部碳酸盐台地广泛分布区,同相轴上超至台地顶部,表明该阶段碳酸盐台地已被海水淹没(图 8a-b)。这些地震响应指示了 SU4 时期区域性海平面的显著上升,沉积环境主要受海平面变化控制。SU4 内部以 SF3 地震相为主,代表静水环境下沉积。与 SU1 中局限于湖泊环境的沉积相比, SU4 中的地震相 SF3 横向展布范围更广,可连续超过上百千米(图 3-4),推测其为区域性的浅海相沉积。此外,结合 SF5 与 SF6 的地震反射特征,解释其为火山丘与同期岩浆侵入形成的岩床,反映该时期存在一定规模的海底火山活动^[63]。火山喷发导致应力释放,火山丘顶部发育一系列正断层(图 11)。地质背景资料显示,该阶段再次发生海侵,古水深较现今深约 50 m,盆地主要物源来自西北加里曼丹岛,经由盆地东南侧的古河口系统(如 Maludam 河口)向研究区供给碎屑物质^[23]。广泛分布的浅海沉积为下伏碳酸盐台地提供了优质盖层,构成良好的储盖组合,对区域油气资源的勘探开发具有重要潜力^[17,64-66]。

因此,地震地层单元 SU4 代表区域沉降期的沉积阶段,该时期区域构造背景趋于稳定,沉积环境与曾母盆地和北康盆地类似,以浅海环境为主,伴随局部火山活动的出现以及北部早期碳酸盐建造的退化与淹没,构成盆地沉积演化的重要阶段(图 2c)。

4.5 SU5 (早上新世—中上新世, 约 5.3~3.3 Ma)

地震地层单元 SU5 的底部界面为 H4, 顶部界面为 H5, 对应西纳土纳盆地上 Muda 组沉积, 时代为早上新世至中上新世(约 5.3~3.3 Ma)(图 2b-c, 图 3-4)。在地震剖面上, SU5 整体表现为席状反射体,厚度横向变化较小,沿陆坡方向厚度逐渐增大(图 4)。内部以中等-强振幅、高连续、平行-亚平行和前积反射特征为主,与下伏地层单元 SU4 整合接触(图 3-4)。SU5 主要发育地震相 SF3(图 5c),北部陆坡区发育地震相 SF9(图 5i),而在东南部边缘区可见地震相 SF8 的局部分布(图 5h)。平面上,该单元沉积厚度较薄(多小于约 1000 m),总体分布较为均匀,垂直盆地走向方向厚度逐渐增加,沉积中心相较 SU4 略向东北收缩(图 10e)。

SF3 席状沉积分布广泛、振幅较弱,反射连续性极好。结合该时期区域海侵进一步扩大(古水深较现今深约 80 m)的古地理背景,推断该套地震相代表浅海至半深海环境下的静水沉积^[67]。SF9 为典型的前积体沉积,其地震响应特征表现为中等-强振幅、倾斜前积构造清晰,顺物源方向常呈楔状或前积斜坡体形态,同相轴自陆向海倾斜排列,指示沉积物自源区不断推进并堆积于碳酸盐台地前缘或陆坡斜面。SF9 在 SU5 中广泛分布于北部陆坡区,并直接覆盖早期碳酸盐台地顶部。多期次前积斜坡在纵向相互叠置,其坡折点(即每个前积斜坡从缓坡过渡到陡坡的转折位置)的连线构成古陆架边缘的轮廓序列。该轮廓表现出明显的向海迁移

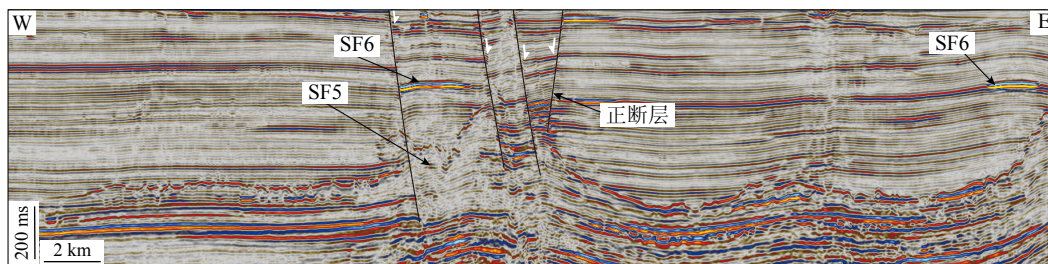


图 11 研究区斜坡带东西向地震剖面
显示地层单元 SU4 内部发育海底火山,位置见图 6d。

Fig.11 The E-W seismic profile of the slope zone in the study area

Submarine volcano was developed and shown in SU4. The location is shown in Fig.6d.

趋势,反映在海平面升至高位且上升速率减缓甚至趋于平稳的阶段,持续的物源供应促使河流—三角洲体系沿盆地边缘陆架不断前移(图 8b)^[68-70]。东南部边缘区局部分布 SF8 为典型的水道相,其内部多期水道复合叠置,规模较大(最宽 3 km 左右,下切深度近 600 m),指示了近源区河流携带陆源沉积物,为上述前积体的发育提供了充足物源(图 8c)。

因此, SU5 清晰记录了早上新世至中上新世区域沉降期构造活动减弱的背景下,区域性海侵达到顶峰之后,近源区陆源供给逐渐增强的沉积响应。该阶段缺乏显著的构造扰动,沉积演化主要受海平面变化主导,是海侵过程控制沉积格局的关键证据。与曾母盆地和北康盆地类似,沉积主体为广泛分布的浅海—半深海相沉积,仅在盆地边缘局部区域发育少量三角洲前积体系(图 2c)。

4.6 SU6 (中上新世—中更新世, 约 3.3~2.5 Ma)

地震地层单元 SU6 的底部界面为 H5,顶部界面为 H6,对应西纳土纳盆地上 Muda 组沉积,时代为中上新世至中更新世(约 3.3~2.5 Ma)(图 2b-c,图 3-4)。在地震剖面上,地层单元 SU6 与下伏地层单元 SU5 整合接触,整体特征类似,内部广泛发育 SF8、SF9 地震相和 SF3 地震相垂向互层组合(图 5h-i,图 5c)。平面上, SU6 沉积厚度在盆地东北部达到最大,构成主要沉积中心,其余区域厚度较为均一,沉积中心相较 SU5 略向西北移(图 10f)。

SU6 在地震剖面上表现为连续性好的平行反射结构,缺乏褶皱、错断等强烈构造扰动特征。其次,该地震单元断层活动明显减弱,大多数断层终止于 H5 界面以下,在 SU6 内断距较小,未对沉积厚度分布产生显著控制。此外, SU6 在盆地大部分区域厚度分布平缓,仅向东北部逐渐增厚,呈现典型的热沉降背景下均衡沉积特征。因此,该时期区域构造活动较弱,整体处于构造相对宁静阶段,盆地演化主要受热沉降与均衡调整过程控制。SU6 内部 SF8 与 SF9 地震相代表低海平面(冰期)阶段发育的河流与三角洲前积体沉积,指示近源、高能、陆相或浅水环境。SF3 则对应高海平面(间冰期)阶段广泛发育的中—浅海相沉积,反映较深水、低能量的静水环境。这类不同地震相之间的垂向互层组合,是早第四纪冰期—间冰期旋回驱动海平面周期性大幅波动的直接沉积响应(图 9a)^[6,25,49]。此外 SF7 垂向上表现为点状强振幅叠置,规模相对较小(宽数米,高约几十米)。但通常成片地与 SF8 地震相伴生(图 5g),将其解释为纵向流体通道,指示了活

跃的古流体活动的迹象^[71]。

因此,地震地层单元 SU6 记录了中上新世至中更新世期间,在构造稳定背景下,由海平面变化主导的河流—三角洲与中—浅海沉积互层充填过程。与西纳土纳盆地类似,展现了冰期—间冰期旋回控制下的沉积演化特征(图 2c)。

4.7 SU7 (中更新世至今, 约 2.5~0 Ma)

地震地层单元 SU7 的底部界面为 H6,顶部界面为现今海底,对应西纳土纳盆地上 Muda 组沉积,时代为中更新世至现今(约 2.5~0 Ma)(图 2b-c,图 3-4)。地震剖面上, SU7 主要发育 SF8、SF9 和 SF10 三种地震相(图 5h-j)。在平面上,沉积地层厚度东部较厚且向东北逐渐增大,东北部是主要的沉积中心,沉积中心相较 SU6 略向西北拓展(图 10g)。

地震相 SF8 解释为暴露的陆架及陆坡上发育的大型下切水道或海底峡谷的充填沉积,以河流相和河口三角洲相沉积为主,反映出在低海平面时期强烈侵蚀与物源输入作用下的沉积过程。SF9 地震相则代表古河流携带大量陆源碎屑物沿东北方向快速进积,形成大规模的三角洲前积体,标志着沉积作用从近岸向深水盆地的推进(图 9b)^[69]。河流与三角洲前积体都属于相对低海平面时期的沉积体系。在更新世冰期阶段,全球海平面显著下降,陆架大面积出露,促使苏门答腊与婆罗洲之间的浅海区域干露成陆,古河流体系得以贯通,并在隆起陡坡带广泛发育水道下切(图 12)^[72-73]。北巽他河系等来自亚洲大陆的古河流向东北方向穿越纳土纳地区,携带大量陆源碎屑物注入盆地,形成广泛分布的河流—三角洲沉积^[7,72-78]。SF10 地震相具有明显的垂向通道特征,能够贯穿多个地层单元,其特殊的地震反射形态常与底部天然气或其他流体的聚集与向上运移过程相关,反映出深部流体向浅层甚至海底逸散的活动路径(图 5j)^[79-80]。

因此,地震地层单元 SU7 形成于中更新世以来的冰期—间冰期旋回背景。与巽他陆架西纳土纳盆地、曾母盆地和万安盆地类似, SU7 沉积体系主要表现为河流、三角洲与浅海相的频繁交替发育,反映出低海平面时期强烈的河流输入与下切作用(图 2c)。此外, SU7 中广泛发育的垂向流体通道地震相(SF10)指示存在活跃的浅层气运移活动,揭示该区在现代沉积背景下的流体动力过程及其潜在地质风险。

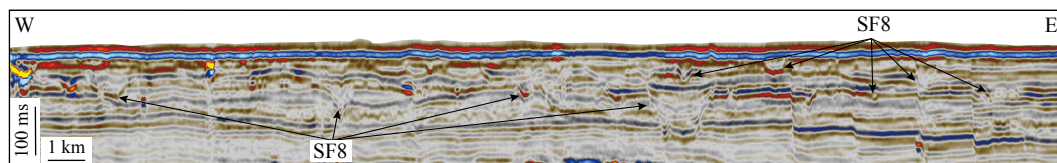


图 12 研究区南部东西向地震剖面
显示地层单元 SU7 内部广泛发育水道下切, 剖面位置见图 6g。

Fig.12 The E-W seismic profile of the southern part of the study area

The channel incision was widely developed in SU7. The location is shown in Fig.6g.

5 充填演化过程

巽他陆架东部的沉积充填演化始于晚始新世(约 38 Ma)。在走滑-伸展应力场控制下进入断陷期(SU1, 38~28 Ma), 发育一系列正断层主导的不对称半地堑构造体系, 为后续沉积物充填提供了可容空间, 奠定了沉积格局。此时期沉积以陆相为主, 西南部与东东南部邻近纳土纳隆起的物源区发育扇三角洲体系, 而半地堑内部为静水环境下的湖相沉积。至中渐新世(约 28 Ma), 区域构造活动减弱, 巽他陆架东部转入断拗期(SU2, 28~20 Ma)。伴随热沉降与海平面上升, 沉积中心从断层边缘逐步拓展至中部, 形成厚度可达 5 000 m 的浅海—滨岸相席状沉积, 早期半地堑逐渐被充填, 标志着区域性海侵的开始。

早中新世(约 20 Ma), 区域构造格局发生根本转变, 挤压应力导致构造反转, 沉积体系发生重组(SU3, 20~11.6 Ma)。西缘和南缘(纳土纳隆起)的隆升作用导致水深变浅, 同时海水自海盆逐渐漫入陆架, 沉积范围向东北收缩, 沉积分异显著: 隆起带和东南部加里曼丹物源区持续供给碎屑, 形成三角洲—滨岸沉积; 北部远离物源的陆架则发育碳酸盐台地和生物礁。构造反转一直持续到晚中新世, 形成了重大区域不整合界面 H3, 拉开了构造转为静稳、海平面升降成为主控沉积环境的序幕。

晚中新世至中上新世(SU4-SU5, 11.6~3.3 Ma)进入区域沉降期, 构造趋于静稳, 海平面持续上升。晚中新世开始, 持续海侵背景下广泛披覆浅海—半深海相沉积, 碳酸盐台地衰退并发育火山活动。早上新世, 海侵达到顶峰, 但陆源供给较强, 在盆地边缘局部区域发育少量三角洲前积体系, 沉积范围向东北收缩。进入中上新世—第四纪的区域沉降期(SU5-SU7, 3.3 Ma 至今), 巽他陆架东部的沉积演化主要受控于冰期旋回引起的海平面升降, 沉积中心持续北移。SU6 发育河流相与浅海相互层沉积;

SU7 则记录更强烈的暴露—淹没旋回: 冰期低海平面时, 区域性水道的下切指示了北巽他河等古河系发育处于顶峰期, 贯通了苏门答腊与婆罗洲, 向东北输送大量碎屑沉积物, 形成大型三角洲前积体与陆坡下切峡谷。间冰期海侵, 则覆盖浅海相沉积。

综上, 巽他陆架东部新生代演化经历了断陷期(晚始新世至早渐新世, 约 38~28 Ma)、断拗期(晚渐新世至早中新世, 约 28~20 Ma)、构造反转期(早中新世至晚中新世, 约 20~11.6 Ma)和区域沉降期(晚中新世至今, 约 11.6~0 Ma)四个主要阶段。沉积充填以浅海相为背景, 间夹三角洲、碳酸盐和火山建造, 呈现构造控制与海平面响应共同作用下显著的沉积分异特征。断陷期和断拗期构造主控, 并受到海平面升降综合影响, 沉积由陆相向浅海—滨岸相转变; 反转期挤压反转引发南北沉积分异, 碎屑沉积体系与碳酸盐台地并存; 区域沉降期沉积充填则与海平面变化密切耦合, 河流—三角洲相与浅海相沉积不断叠置。

6 结论

(1) 巽他陆架东部新生代沉积记录连续, 对区域古环境演变具有典型指示意义, 是揭示巽他陆架地质演化过程及其对全球气候与海平面变化响应机制的关键地区。其新生代沉积充填过程可划分为 4 个主要阶段: 断陷期(晚始新世—早渐新世)、断拗期(晚渐新世—早中新世)、构造反转期(早—晚中新世)以及区域沉降期(晚中新世至今), 整体呈现出“伸展断陷—稳定热沉降—构造反转挤压—海平面波动控制下的沉积充填”的演化序列(图 2c)。

(2) 研究区新生代地层整体以浅海相沉积为主, 局部发育三角洲、碳酸盐台地和海底火山等多种沉积体系。断陷期主要为河流—三角洲及湖泊等陆相沉积(SU1); 断拗期沉积环境逐渐过渡为浅海—滨岸相(SU2); 反转期以浅海相沉积为主, 但呈

现南部隆起带河流相、中东部近源区滨浅海相、北部远源区碳酸盐台地明显沉积分异(SU3); 区域沉降期沉积环境由浅海相演化至浅海—半深海相(SU4–SU5), 再转变为陆相河流—三角洲为主的沉积环境(SU6); 至更新世(SU7), 受冰期海平面显著下降的影响, 广泛发育河流、三角洲与浅海沉积环境频繁交替出现的沉积体系(图2c)

(3)研究区的新生代沉积演化过程受构造活动与海平面变化的双重控制。在断陷—断拗期, 区域构造活动决定了沉积格局: 断陷期同沉积断裂活动下陆相沉积趋向断层一侧, 而断拗期断裂活动逐渐减弱, 区域热沉降下沉积中心向中部迁移、沉积范围扩大且转为海相。进入构造反转期, 区域构造挤压作用增强以及区域性海侵, 导致研究区南北陆海沉积分异格局。至区域沉降期, 构造活动逐渐减弱, 海平面频繁升降成为主导因素, 控制了河流—三角洲与海泛沉积的交互发育过程。

致谢: 特此感谢印度尼西亚能源与矿产资源部(MDR)提供的反射地震数据支持。本文系第二十七届中国科协年会学术论文。

参考文献 (References)

- [1] Ben-Avraham Z, Emery K O. Structural framework of Sunda Shelf[J]. AAPG Bulletin, 1973, 57(12): 2323-2366.
- [2] Hall R. Southeast Asia's changing palaeogeography[J]. Blumea - Biodiversity, Evolution and Biogeography of Plants, 2009, 54(1-3): 148-161.
- [3] 姚伯初. 南海海盆新生代的构造演化史[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1996, 16(2): 1-13. [YAO Bochu. Tectonic evolution of the South China Sea in Cenozoic[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1996, 16(2): 1-13.]
- [4] Hutchison C S. Marginal basin evolution: the southern South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2004, 21(9): 1129-1148.
- [5] Tjia H D, Liew K K. Changes in tectonic stress field in northern Sunda Shelf basins[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1996, 106(1): 291-306.
- [6] Leknetip S, Chawchai S, Alexander Fülling, et al. et al. Pleistocene sea-level and environmental changes during glacial-interglacial cycles recorded in beach ridges of the Thai-Malay Peninsula[J]. Quaternary Science Reviews, 2025, 364: 109464.
- [7] Hanebuth T J J, Statterger K. Depositional sequences on a late Pleistocene-Holocene tropical siliciclastic shelf (Sunda Shelf, southeast Asia)[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 23(1): 113-126.
- [8] Zhong G F, Geng J H, Wong H K, et al. A semi-quantitative method for the reconstruction of eustatic sea level history from seismic profiles and its application to the southern South China Sea[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 223(3-4): 443-459.
- [9] 李丽, 徐沁. 上新世以来巽他陆架海平面变化研究[J]. 地球科学进展, 2017, 32(11): 1126-1136. [LI Li, XU Qin. Review of studies in sea level change of Sunda Shelf since Pliocene[J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(11): 1126-1136.]
- [10] Lunt P. A new view of integrating stratigraphic and tectonic analysis in South China Sea and north Borneo basins[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 177: 220-239.
- [11] Lunt P. A reappraisal of the Cenozoic stratigraphy of the Malay and West Natuna Basins[J]. Journal of Asian Earth Sciences: X, 2021, 5: 100044.
- [12] Morley R J, Morley H P, Restrepo-Pace P. Unravelling the tectonically controlled stratigraphy of the West Natuna Basin by means of palaeo-derived mid Tertiary climate changes[J]. 2003: 1-24.
- [13] Madon M, Ly K C, Wong R. The structure and stratigraphy of deepwater Sarawak, Malaysia: Implications for tectonic evolution[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 76: 312-333.
- [14] Surjono S S, Afandi M, Arifianto I, et al. Sedimentology and reservoir characteristics of syn-rift to syn-inversion succession in Anoa half-graben, West Natuna basin, Indonesia[J]. Marine and Petroleum Geology, 2023, 152: 106258.
- [15] Catuneanu O, Abreu V, Bhattacharya J P, et al. Towards the standardization of sequence stratigraphy[J]. Earth-Science Reviews, 2009, 92(1-2): 1-33.
- [16] Catuneanu O. Principles of Sequence Stratigraphy[M]. Amsterdam: Elsevier, 2006.
- [17] 姚永坚, 吴能友, 夏斌, 等. 南海南部海域曾母盆地油气地质特征[J]. 中国地质, 2008, 35(3): 503-513. [YAO Yongjian, WU Nengyou, XIA Bin, et al. Petroleum geology of the Zengmu basin in the southern South China Sea[J]. Geology in China, 2008, 35(3): 503-513.]
- [18] 周蒂, 孙珍, 杨少坤, 等. 南沙海区曾母盆地地层系统[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2011, 36(5): 789-797. [ZHOU Di, SUN Zhen, YANG Shaokun, et al. The stratigraphic system of the Zengmu Basin, southern South China Sea[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2011, 36(5): 789-797.]
- [19] 姚永坚, 杨楚鹏, 李学杰, 等. 南海南部海域中新世(T_3 界面)构造变革界面地震反射特征及构造含义[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1274-1286. [YAO Yongjian, YANG Chupeng, LI Xuejie, et al. The seismic reflection characteristics and tectonic significance of the tectonic revolutionary surface of mid-Miocene (T_3 seismic interface) in the southern South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(4): 1274-1286.]
- [20] 骆帅兵, 张莉, 王笑雪, 等. 南海南部南安盆地新生代以来构造-沉积演化特征及区域成藏模式[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(4): 116-128. [LUO Shuaibing, ZHANG Li, WANG Xiaoxue, et al. The tectono-sedimentary evolution characteristics and regional reservoir-forming model of Nan'an Basin in the Cenozoic[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(4): 116-128.]
- [21] 徐俊杰, 徐宏根, 刘道涵, 等. 南海南部曾母盆地的原型盆地划分及其形成演化过程[J]. 华南地质与矿产, 2020, 36(3): 221-231. [XU Junjie, XU Honggen, LIU Daoan, et al. Division, formation and evolution of the prototypes of the Zengmu Basin in southern South China

- Sea[J]. *South China Geology*, 2020, 36(3): 221-231.]
- [22] Mat-Zin I C, Tucker M E. An alternative stratigraphic scheme for the Sarawak Basin[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 1999, 17(1-2): 215-232.
- [23] Raharja M, Carmody S, Cherdasa J R, et al. Dual Paleogene and Neogene petroleum systems in east Natuna Basin: identification of a new exploration play in the South Sokang area[C]//Proceedings, Indonesian Petroleum Association Thirty-Seventh Annual Convention & Exhibition. Indonesia: Indonesian Petroleum Association (IPA), 2013.
- [24] Madon M, Jong J. The crustal structure and evolution of the Bunguran Trough, offshore Sarawak, Malaysia[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 139: 105608.
- [25] Indranadi V B, Djunaedi D. Depositional model of Muda Formation, East Natuna Basin[C]//Proceedings, Indonesian Petroleum Association, Forty-Sixth Annual Convention & Exhibition, 2022. Indonesia: Indonesian Petroleum Association, 2022: 1-15.
- [26] 雷振宇, 张莉, 苏明, 等. 南海南部北康盆地中新世深水沉积体类型、特征及意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(6): 110-118. [LEI Zhenyu, ZHANG Li, SU Ming, et al. Middle Miocene deep-water sediments in the Beikang Basin, southern South China Sea: types, characteristics and implications[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(6): 110-118.]
- [27] Hutchison C S. The 'Rajang accretionary prism' and 'Lupar Line' problem of Borneo[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1996, 106(1): 247-261.
- [28] 赵帅, 李学杰, 姚永坚, 等. 南海南部造山运动及其与古南海俯冲的成因联系[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(5): 147-162. [ZHAO Shuai, LI Xuejie, YAO Yongjian, et al. Orogenic events in Southern South China Sea and their relationship with the subduction of the Proto South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(5): 147-162.]
- [29] 解习农, 赵帅, 任建业, 等. 南海后扩张期大陆边缘闭合过程及成因机制[J]. *地球科学*, 2022, 47(10): 3524-3542. [XIE Xinong, ZHAO Shuai, REN Jianye, et al. Marginal sea closure process and genetic mechanism of South China Sea during post-spreading period[J]. *Earth Science*, 2022, 47(10): 3524-3542.]
- [30] 张翀, 吴世敏, 丘学林. 南海南部海区前陆盆地形成与演化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27(1): 61-70. [ZHANG Chong, WU Shimin, QIU Xuelin. Formation of foreland basins in the south of the South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 27(1): 61-70.]
- [31] HUTCHISON C S. *Geological Evolution of South-East Asia*[M]. Oxford: Clarendon Press, 1989.
- [32] 栾锡武, 张亮. 南海构造演化模式: 综合作用下的被动扩张[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(6): 59-74. [LUAN Xiwu, ZHANG Liang. Tectonic evolution modes of South China sea: passive spreading under complex actions[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(6): 59-74.]
- [33] Hall R. Reconstructing Cenozoic SE Asia[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1996, 106(1): 153-184.
- [34] Hall R. Sundaland and Wallacea: geology, plate tectonics and palaeogeography[M]//Gower D J, Richardson J E, Rosen B R, et al. *Biotic Evolution and Environmental Change in Southeast Asia*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012: 32-78.
- [35] Darman H. Seismic expression of key geological features in the East Natuna Basin[J]. *Berita Sedimentologi*, 2017, 38(1): 50-61.
- [36] Cullen A B. Transverse segmentation of the Baram-Balabac Basin, NW Borneo: refining the model of Borneo's tectonic evolution[J]. *Petroleum Geoscience*, 2010, 16(1): 3-29.
- [37] Meirita M F. Structural and depositional evolution, KH field, West Natuna Basin, offshore Indonesia[D]. Texas: Texas A&M University, 2003.
- [38] Ginger D C, Ardjakusumah W O, Hedley R J, et al. Inversion history of the West Natuna Basin: examples from the Cumi-Cumi PSC[C]//22nd Annual Convention Proceedings, Proceedings of Indonesian Petroleum Association. Indonesia: Indonesian Petroleum Association, 1993: 635-658.
- [39] ARDHIE M N. An inversion structure and its implication for structural trapping mechanism: Study of Kakap PSC West Natuna basin, Indonesia[D]. Arlington: University of Texas at Arlington, 2004.
- [40] Morley R J, Swiecicki T, Pham D T T. A sequence stratigraphic framework for the Sunda region, based on integration of biostratigraphic, lithological and seismic data from Nam Con Son Basin, Vietnam[C]//Proceedings, Indonesian Petroleum Association Thirty-Fifth Annual Convention & Exhibition. Indonesia: Indonesian Petroleum Association (IPA), 2011.
- [41] Yakzan A M, Harun A, Nasib B M, et al. Integrated biostratigraphic zonation for the Malay Basin[J]. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 1996, 39: 157-184.
- [42] Tjia H D. Wrench-slip reversals and structural inversions: Cenozoic slide-rule tectonics in Sundaland[J]. *Indonesian Journal on Geoscience*, 2014, 1(1): 35-52.
- [43] 赵斐宇, 姜素华, 李三忠, 等. 曾母拉分盆地的油气成藏规律: 廷贾-西巴兰线断裂的控制[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(4): 209-220. [ZHAO Feiyu, JIANG Suhua, LI Sanzhong et al. Hydrocarbon accumulation in Zengmu Pull-Apart Basin: insights from the control of Tin Jar-West Baram line[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(4): 209-220.]
- [44] 杨木壮, 吴进民. 南海南部新生代构造应力场特征与构造演化[J]. *热带海洋*, 1996, 15(2): 45-52. [YANG Muzhuang, WU Jinmin. Tectonic stress field and tectonic evolution in the south of South China Sea[J]. *Tropic Oceanology*, 1996, 15(2): 45-52.]
- [45] 贺华瑞, 栾锡武, 魏新元, 等. 南昆嵩地区断裂-构造演化特征及其控制因素[J]. *海洋学报*, 2022, 44(12): 95-108. [HE Huarui, LUAN Xi-wu, WEI Xinyuan, et al. Characteristics of fault-tectonic evolution and its controlling factors in the South Kunsong area[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(12): 95-108.]
- [46] Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic[J]. *Science*, 1987, 235(4793): 1156-1167.
- [47] Dalrymple R W, Boyd R, Zaitlin B A. Incised-Valley Systems: Origin and Sedimentary Sequences[M]. Tulsa: SEPM, 1994.
- [48] Darmadi Y, Willis B J, Dorobek S L. Three-dimensional seismic architecture of fluvial sequences on the low-gradient Sunda Shelf, Offshore Indonesia[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2007, 77(3): 225-238.

- [49] Hanebuth T J J, Statterger K, Bojanowski A. Termination of the Last Glacial Maximum sea-level lowstand: the Sunda-Shelf data revisited[J]. *Global and Planetary Change*, 2009, 66(1-2): 76-84.
- [50] Miller K G, Komins M A, Browning J V, et al. The Phanerozoic record of global sea-level change[J]. *Science*, 2005, 310(5752): 1293-1298.
- [51] Miller K G, Browning J V, Schmelz W J, et al. Cenozoic sea-level and cryospheric evolution from deep-sea geochemical and continental margin records[J]. *Science Advances*, 2020, 6(20): eaaz1346.
- [52] Dash B P, Shepstone C M, Dayal S, et al. Seismic investigation on the northern part of the Sunda Shelf south and east of Great Natuna Island[J]. Technical Bulletin of the Committee for Coordination of Joint Prospecting for Mineral Resources in Asian Offshore Areas (CCOP), United Nations Economic Commission for Asia and the Far East, 1972, 6(9): 179-196.
- [53] 邱燕. 南沙海域曾母盆地构造样式特征及其与油气聚集和圈闭的关系[J]. *地质通报*, 2005, 24(1): 16-22. [QIU Yan. Typical structural styles and their relationships with hydrocarbon accumulation and traps in the Zengmu basin, Nansha sea area[J]. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(1): 16-22.]
- [54] 解习农, 任建业, 王振峰, 等. 南海大陆边缘盆地构造演化差异性及其与南海扩张耦合关系[J]. *地学前缘*, 2015, 22(1): 77-87. [XIE Xinong, REN Jianye, WANG Zhenfeng, et al. Difference of tectonic evolution of continental marginal basins of South China Sea and relationship with SCS spreading[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 77-87.]
- [55] Hall R. The palaeogeography of Sundaland and Wallacea since the Late Jurassic[J]. *Journal of Limnology*, 2013, 72(S2): 1-17.
- [56] 贺华瑞, 栾锡武, 魏新元, 等. 万安盆地西部南昆崙地区渐新世以来构造事件的沉积响应[J]. *地质科学*, 2022, 57(3): 653-670. [HE Huarui, LUAN Xiwu, WEI Xinyuan, et al. Sedimentary responses to tectonic events since the Oligocene in the South Kunsong area of the western Wan'an Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2022, 57(3): 653-670.]
- [57] Morley R J, Morley H P. Mid Cenozoic freshwater wetlands of the Sunda region[J]. *Journal of Limnology*, 2013, 72(S2): 18-35.
- [58] 陈建宏, 肖菲, 栾锡武. 东南亚地区裂谷作用对油气成藏组合的控制[J]. *海洋地质前沿*, 2023, 39(3): 20-29. [CHEN Jianhong, XIAO Fei, LUAN Xiwu. Control of rifting on hydrocarbon plays in South-east Asia[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2023, 39(3): 20-29.]
- [59] 肖鸿议, 何云龙, 解习农, 等. 南海万安盆地构造-层序发育特征与构造-沉积充填演化[J]. *地球科学*, 2021, 46(9): 3338-3351. [XIAO Hongyi, HE Yunlong, XIE Xinong, et al. Characteristics of structural-sequence and evolution of tectonic and sedimentary of Wan'an Basin in South China Sea[J]. *Earth Science*, 2021, 46(9): 3338-3351.]
- [60] 姚永坚, 夏斌, 徐行. 南海南部海域主要沉积盆地构造演化特征[J]. *南海地质研究*, 2005(1): 1-11. [YAO Yongjian, XIA Bin, XU Xing. Tectonic evolution of the main sedimentary basins in southern area of the South China Sea[J]. *Research of Geological South China Sea*, 2005(1): 1-11.]
- [61] Hassan M H A, Johnson H D, Allison P A, et al. Sedimentology and stratigraphic architecture of a Miocene retrogradational, tide-dominated delta system: Balingian Province, offshore Sarawak, Malaysia[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2017, 444: 215-250.
- [62] Webb M, Gough A, Endinanda F. Depositional environments and sedimentary provenance of the Cenozoic deposits of Natuna Island, Indonesia: Implications for basin evolution in central Sundaland[J]. *Gondwana Research*, 2024, 134: 298-325.
- [63] Song X X, Li C F, Yao Y J, et al. Magmatism in the evolution of the South China Sea: geophysical characterization[J]. *Marine Geology*, 2017, 394: 4-15.
- [64] 姚伯初, 刘振湖. 南沙海域沉积盆地及油气资源分布[J]. *中国海上油气*, 2006, 18(3): 150-160. [YAO Bochu, LIU Zhenhu. Sedimentary basins and petroleum resources in Nansha offshore area, South China Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2006, 18(3): 150-160.]
- [65] 解习农, 张成, 任建业, 等. 南海南北大陆边缘盆地构造演化差异性对油气成藏条件控制[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(12): 3280-3291. [XIE Xinong, ZHANG Cheng, REN Jianye, et al. Effects of distinct tectonic evolutions on hydrocarbon accumulation in northern and southern continental marginal basins of South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(12): 3280-3291.]
- [66] 谢晓军, 张功成, 赵志刚, 等. 曾母盆地油气地质条件、分布特征及有利勘探方向[J]. *中国海上油气*, 2015, 27(1): 19-26. [XIE Xiaojun, ZHANG Gongcheng, ZHAO Zhigang, et al. Hydrocarbon geology, distribution and favorable exploration direction in Zengmu basin, South China Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2015, 27(1): 19-26.]
- [67] 苏海霞, 刘嫫, 张莉, 等. 南海南部北康盆地晚中新世以来深水沉积单元时空分布特征及其控制因素[J]. *地质科技通报*, 2023, 42(6): 129-139. [SU Haixia, LIU Shan, ZHANG Li, et al. Spatiotemporal distribution characteristics and controlling factors of deep-water sediments in the Beikang Basin since the Late Miocene, southern South China Sea[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(6): 129-139.]
- [68] 武强, 解习农, 姜涛. 陆架边缘三角洲的研究现状及其意义[J]. *海洋地质动态*, 2005, 21(3): 1-5. [WU Qiang, XIE Xinong, JIANG Tao. Study situation of shelf-margin delta and its significance[J]. *Marine Geology Letters*, 2005, 21(3): 1-5.]
- [69] 贺华瑞, 栾锡武, 龚梁轩, 等. 南昆崙凹陷中新世以来三角洲地震响应与沉积充填演化[J]. *沉积学报*, 2023, 41(5): 1568-1582. [HE Huarui, LUAN Xiwu, GONG Liangxuan, et al. Seismic response and sedimentary filling evolution of a delta since the Miocene in the South Kunsong Sag[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(5): 1568-1582.]
- [70] 汤智逸, 解习农, 徐俊杰, 等. 曾母盆地古拉让三角洲发育演化定量表征及其控制因素分析[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2025, 47(1): 147-162. [TANG Zhiyi, XIE Xinong, XU Junjie, et al. Quantitative characterization of evolution and controlling factors of Paleo-Rajang Delta in the Zengmu Basin[J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2025, 47(1): 147-162.]
- [71] 徐燕东. 串珠状缝洞型储层油藏产能指示曲线解析[J]. *油气井测试*, 2023, 32(6): 65-71. [XU Yandong. Analysis of productivity indicator curves for bead-shaped fractured-vuggy oil reservoirs[J]. *Well Testing*,

- 2023, 32(6): 65-71.]
- [72] Molengraaff G A F. Modern deep-sea research in the East Indian archipelago[J]. *The Geographical Journal*, 1921, 57(2): 95-118.
- [73] Voris H K. Maps of Pleistocene sea levels in Southeast Asia: shorelines, river systems and time durations[J]. *Journal of Biogeography*, 2000, 27(5): 1153-1167.
- [74] Hanebuth T J J, Stattegger K, Schimanski A. Late Pleistocene forced-regressive deposits on the Sunda Shelf (Southeast Asia)[J]. *Marine Geology*, 2003, 199(1-2): 139-157.
- [75] Hanebuth T J, Stattegger K, Saito Y. The stratigraphic architecture of the central Sunda Shelf (SE Asia) recorded by shallow-seismic surveying[J]. *Geo-Marine Letters*, 2002, 22(2): 86-94.
- [76] Hanebuth T J J, Voris H K, Yokoyama Y, et al. Formation and fate of sedimentary depocentres on Southeast Asia's Sunda Shelf over the past sea-level cycle and biogeographic implications[J]. *Earth-Science Reviews*, 2011, 104(1-3): 92-110.
- [77] Huang E Q, Yuan Z J, Wang S H, et al. Expansion of grasslands across glacial Sundaland caused by enhanced precipitation seasonality[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2024, 337: 108824.
- [78] Liu Z F, Zhao Y L, Colin C, et al. Source-to-sink transport processes of fluvial sediments in the South China Sea[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 153: 238-273.
- [79] 张伯达, 雷振宇, 郑文义, 等. 地震资料中柱状流体运移通道形态参数及其地质意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(3): 171-181. [ZHANG Boda, LEI Zhenyu, ZHENG Wenyi, et al. Morphological parameters and geological significance of the columnar fluid migration pathways in seismic profiles[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(3): 171-181.]
- [80] 骆迪, 蔡峰. 大陆边缘沉积盆地流体逸散管道地震特征及其成因机制 [J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(1): 1-10. [LUO Di, CAI Feng. Seismic characteristic and genetic mechanism of fluid escape pipes in sedimentary basins of continental margin[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2017, 33(1): 1-10.]