

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020060801

南海北部海域中东部陆架坡折带类型与迁移演化及成因

黄文凯^{1,2}, 邱燕¹, 彭学超¹, 聂鑫^{1,2}, 卓海腾³, 付潮罡⁴

1. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广州 510075

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458

3. 中山大学海洋学院, 广州 510275

4. 广州市地质调查院, 广州 510440

摘要: 为了研究南海北部海域中、东部陆架坡折带在不同年代的迁移特征, 分析了高精度单道地震剖面与地质浅钻等资料。在南海北部海域珠江口外区、东沙区和台湾浅滩区的陆架及陆坡带附近第四纪地层中, 共识别出 6 个三级层序界面以及相应的沉积层序, 同时识别了 6 个区域下切侵蚀面, 并以此为依据认识了本区第四纪河道的演化特征, 建立了层序地层格架。在此基础上, 将该区第四纪陆架坡折带由西至东划分为建设型、侵蚀型和转换型三种类型, 讨论了各段陆架坡折带的演化规律, 提出构造地貌成因、水下河道发育与沉积物供给等作用均为控制陆架坡折带发育和迁移的主要因素。

关键词: 层序地层格架; 陆架坡折带; 成因分析; 南海北部

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

Types and migration of shelf-breaks in the central and eastern parts of the Northern South China Sea and their origin

HUANG Wenkai^{1,2}, QIU Yan¹, PENG Xuechao¹, NIE Xin^{1,2}, ZHUO Haiteng³, FU Chaogang⁴

1. Guangzhou Marine Geological Survey of China Geological Survey, Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510075, China

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China

3. School of Marine Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

4. Guangzhou Geologic Survey Institute, Guangzhou 510440, China

Abstract: This paper focuses on the types and characteristics of shelf-break migration in the Central and Eastern parts of the Northern South China Sea in the period of Quaternary. Based on the data of high-resolution seismic profiles and geological cores, six 3rd order sequences and their boundaries have been identified. Upon the basis, three types of shelf-breaks are recognized as well. They are the shelf-breaks on depositional continental margin, erosional continental margin and tectonic-controlled continental margin from west to east, formed by the joint action of tectonism, underwater channeling, sedimentary supply and other factors.

Key words: sequence stratigraphic framework; shelf-breaks; cause analysis; Northern South China Sea

对于具有深海盆的海域而言, 其周缘均发育从陆架逐渐过渡到陆坡直至深海盆的独特地貌单元, 相应地发育陆架坡折带, 即陆架与陆坡的分界。坡折带是一个地貌学概念, 指地形坡度发生突变的带^[1-2]。海域陆架、陆坡地貌形态的演变具有缓慢性和累积性特征, 是构造和沉积演化的直接产物与综合反映。在一个地区, 不同的地层叠置样式、沉积物供给强度、水动力条件及海平面变化控制作用,

带^[1-2]。海域陆架、陆坡地貌形态的演变具有缓慢性和累积性特征, 是构造和沉积演化的直接产物与综合反映。在一个地区, 不同的地层叠置样式、沉积物供给强度、水动力条件及海平面变化控制作用,

资助项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0501); 中国地质调查局项目“中国海及邻域构造演化研究”(GZH201100205), “1:100万汕头幅(F-50)海洋区域地质调查”(GZH201100206), “南海文昌和东方海域 1:25万海洋区域地质调查”(DD20190627), “南部海域 1:100万海洋区域地质调查成果与应用研究”(DD20160138), “南海永兴岛海域 1:5万海洋区域地质调查”(DD20190209)

作者简介: 黄文凯(1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事层序地层学、沉积学及地震资料解释的研究, E-mail: kevinwonghwk@outlook.com

通讯作者: 邱燕(1956—), 女, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事石油地质、海洋地质和构造地质学研究, E-mail: zqiuayan60@163.com

收稿日期: 2020-06-08; **改回日期:** 2020-12-01. 周立君编辑

加之构造差异、与河口位置距离的远近及海水作用强度不同,会造成陆架坡折带不同的迁移演化过程,可使陆架、陆坡区展现出明显不同的地貌形态,造成不同类型的陆架坡折带。可见不同的陆架坡折类型和迁移演化特征,均蕴含了丰富的地质信息。这些地质信息对于分析研究该区的沉积和侵蚀过程具有重要意义,是海洋地质学研究不可或缺的重要环节。

以往因缺少系统的资料,陆架坡折带发育和迁移演化等一度成为海洋学研究的盲点。近几十年来,随着勘探和研究工作的深入^[3-5],分析陆架坡折带发育与迁移的成果也越来越多^[6-10],对于南海海域尤其是北部陆架坡折研究也日益引起人们的重视。但以往对南海北部陆架坡折带的研究往往由于研究目的不同而局限于单一沉积盆地^[6,11-15],尚缺

少基于系统的地质地球物理资料分析。为填补这一空白,本文利用南海北部高精度单道地震剖面与地质浅钻等资料,以第四系层序地层解释为基础,对该区域第四纪陆架坡折类型进行划分,并着重分析其迁移特征,继而讨论导致陆架坡折带迁移的因素。期望本文能为南海陆架边缘坡折带的研究提供新的认识。

1 地质背景

本文所研究的南海北部海域中、东部系指北纬 $114^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 、东经 $20^{\circ}\sim 24^{\circ}$ 范围内的广阔海域,其间跨越长达700 km的陆架—陆架边缘和陆坡等几大地貌单元,囊括了珠江口外区、东沙区和台湾浅滩的陆架、陆坡区域(图1)。

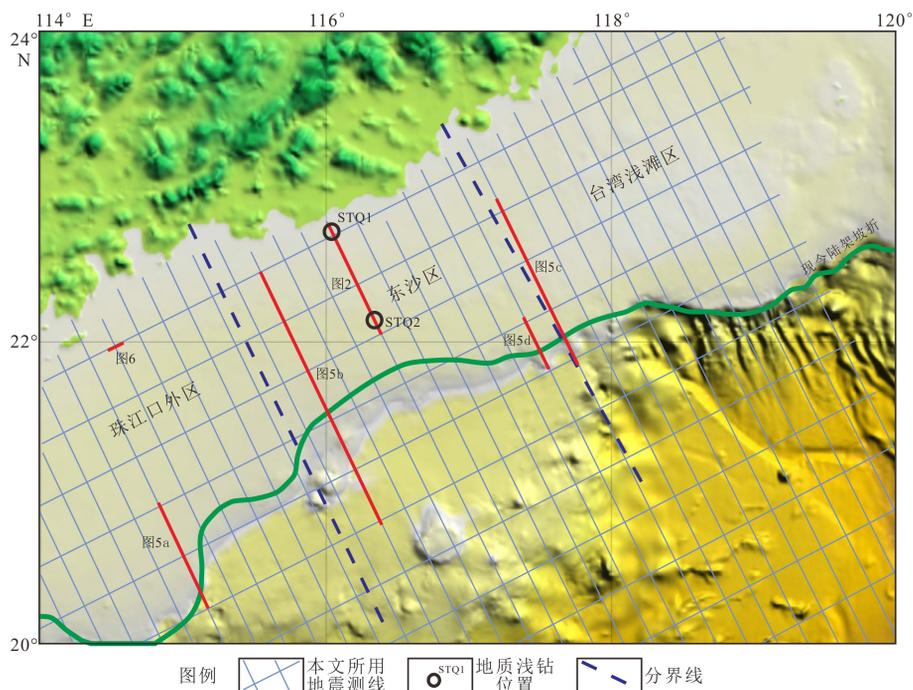


图1 研究区及本文所用资料位置图

Fig.1 The location map of the study area

珠江口外区陆架、陆坡区位于珠江口盆地以南,北东走向,陆架、陆坡发育宽广,南部与深海盆毗邻。陆坡海底地形较为平坦(图1),水深从200 m逐渐加深到1700 m以上,坡度范围为 $1^{\circ}\sim 14.5^{\circ}$,整体坡度变化较大。以1350 m地形等深线为界,可将珠江-白云陆坡分为南北两部分,1350 m水深线以北地区,水体较浅,地形较缓,海底坡度一般为 2° 左右;1350 m以南地区水体较深,地形较陡,海底坡度最大可达 14.5° ,水深最深达1750 m。

东沙区陆架颇为狭窄,陆坡占据的范围较广

(图1),尽管陆坡的第四系沉积相和侵蚀过程与沉积相是分析重点,但由于东沙陆坡长期处于隆升状态,第四系沉积层极薄,沉积特征不明显。

台湾浅滩陆架与陆坡区位于南海北部海域最东部,北接台湾海峡,南临深海平原。台湾浅滩整体呈向南张开的喇叭口状,陆架非常宽广,陆坡比较陡峭(图1)。自北而南其走向逐渐由S-N向转为NE-SW向,向南逐渐开阔且加深,地形上具有东陡西缓的特征。

2 资料

本文研究所使用的资料包含广州海洋地质调查局于 2011 年至 2013 年采集的单道地震测线以及两口地质浅钻(STQ1、STQ2)(位置见图 1)。其中单道地震测量系统由法国 Ixsea 公司 DELPH SEISMIC 工作站、法国 SIG 2Mille 电火花震源和 GI 气枪震源、荷兰 GEO-Resources 公司 GEO-Sense48 型接收电缆及 EPC-1086 记录仪组成。浅水区采用电火花震源, 深水区采用 GI 气枪震源, 均为目前国际上所使用的先进设备。单道地震测线共计 44 条, 测网密度为 20 km×40 km, 测线总长度为 15 899 km; 浅钻 STQ1 位于浅水区, 进尺 71.2 m; STQ2 位于深水区, 进尺 70.56 m。测网密度和资料精度满足本研究的要求。单道地震测量采集参数如表 1 所示。

表 1 单道地震测量工作参数
Table 1 Parameters of single channel seismic survey

调查船	奋斗五号 (陆架区/陆坡区)	奋斗四号 (陆坡区)
激发方式	等时/等距	等时
激发间隔	2 s/25 m	8 s
震源能量	2 000 J/210 in ³	210 in ³
记录长度/ms	1 500/6 000	7 000
采样频率/Hz	4 000/2 000	4 000
滤波范围/Hz	160~1 000/20~800	20~1 000
震源放出长度/m	45	50
电极沉放深度/m	0.5~0.3	0.5~0.3
电缆沉放深度/m	0.5~1	0.5~1
电极与电缆接收中心点间距/m	9/9	14
数据记录格式	SEG-Y	SEG-Y

3 层序界面与层序地层格架

3.1 地震界面划分与年代确定

根据单道地震资料界面反射特征, 共识别出了 6 个地震界面, 自上而下为 R₁、R₂、R₃、R₄、R₅、R₆。另外识别出了 6 个下切侵蚀面, 自上而下为 SB₁、SB₂、SB₃、SB₄、SB₅、SB₆。以 6 个地震界面为界, 相应地划分了 SQ1—SQ6 共 6 个地震层序(图 2)。

为确定这些地震界面和地震层序的地质年代, 对 STQ1 和 STQ2 两口地质浅钻均进行了 AMS ¹⁴C

测年和光释光测年(图 3)。总体上, ¹⁴C 测年数据随深度呈现一定的协相关, 但浅部样品受部分老碳的影响较明显。光释光测年数据与取样深度未表现出协变关系, STQ1 钻孔 4 790 cm 以下的样品无法给出光释光测年结果, 而 STQ2 钻孔 3 030 cm 以下的样品, 光释光测年结果数值相近。两口浅钻具体年代分析如下:

STQ1 钻孔 378 cm 以上的测年结果都小于 1 万年, 为全新世之后的沉积。岩心观察显示, 1 200 cm 处出现土黄色花斑黏土, 为重要的风化剥蚀面, 结合该处上、下部测年结果与沉积物岩性特征, 将 1 082 cm 处年龄定为 12 ka, 为全新统底界。1 185 cm 以下 ¹⁴C 测年结果均大于 4 万年, 超出了 ¹⁴C 测年校正范围。其下光释光年龄均大于 60 kaBP, 且 4 790 cm 以下样品的矿物晶格已释光饱和, 测年数据不可靠。综合微体古生物和岩性特征, 推测上更新统的底界位于 4 820 cm 处, 其下为中更新统, 以 6 902 cm 为界细分为上段和下段, 上段以砾质泥质砂为主, 下段为粉砂和泥。

STQ2 钻孔 978 cm 处 ¹⁴C 测年结果为 10 260 aBP, 1 205 cm 处为 12 860 aBP, 非常接近全新统底界年龄。同时, 993 cm 以上为灰色粉砂质砂, 沉积物中有孔虫和硅藻化石丰富, 与下段含砾粉砂差别明显, 将 993 cm 定为全新统底界。1 500 cm 处测年结果为 16 335 aBP, 在岩性上, 1 485~1 523 cm 段为灰黄色粉砂, 与下部青灰色粉砂界线十分明显, 将 1 523 cm 处定为上更新统上部底界。其下 1 750 和 1 840 cm 处贝壳年龄分别为 29 120、37 030 aBP, 3 个光释光测年结果均小于 59 kaBP, 均为上更新统中部地层。综合分析 1 523 cm 以下沉积物岩性及微体古生物特征, 将 3 718 cm 处定位上更新统中部底界, 6 778 cm 处定为晚更新世早期底界。

结合两口浅钻的测年结果与分层数据以及微体古生物和岩性特征, 通过解释单道地震层序界面反射层特征, 以及珠江口盆地的构造、沉积演化等区域地质资料, 确定了各地震界面和地震层序的地质年代(表 2)。鉴于资料所限, 本文不讨论早更新世早期 Q₁¹ 的地层特征。

通过分析对比, 厘定 R₆、R₅、R₄、R₃、R₂ 和 R₁ 六个界面为层序界面。这些界面的形成经历了海退时期的长期暴露与侵蚀过程^[16-18], 界面的形成具有复合不整合的成因特征, 即在海退时曾受到陆上暴露、河流侵蚀, 其后在水动力作用下保持侵蚀状态或无沉积状态, 经历了多个复杂的水动力作用过程, 以及较长时间的沉积间断(表 2, 图 2)。

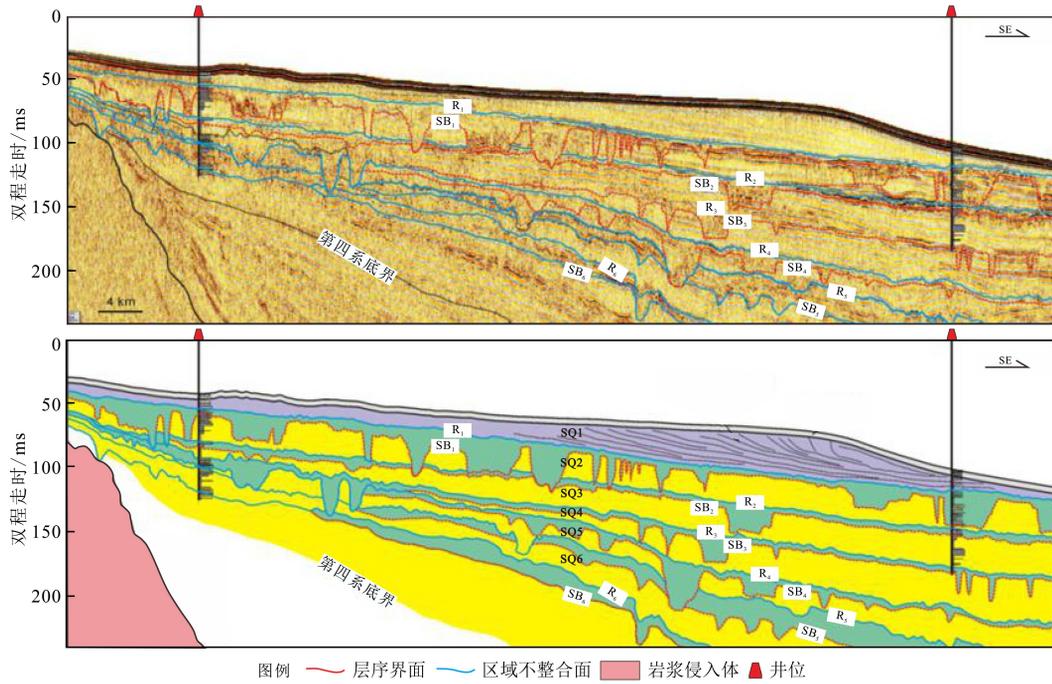


图2 过STQ1-STQ2浅钻的地震剖面选段
示层序界面特征,插图位置见图1。

Fig.2 A selected seismic profile across cores STQ1 and STQ2 showing character of sequence boundaries

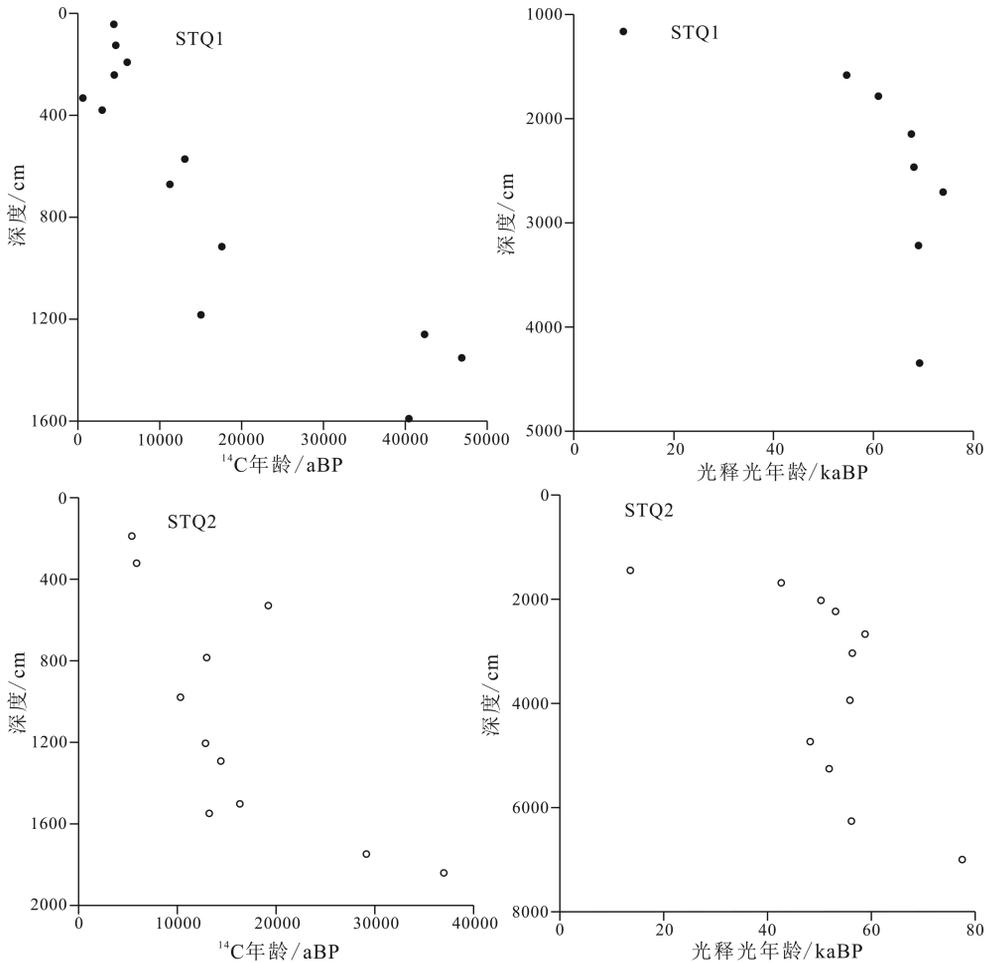


图3 STQ1、STQ2地质浅钻测年结果与深度关系

Fig.3 Dating results from the geological core STQ1 and STQ2

表 2 地震界面与地震层序划分及地质年代属性
Table 2 Seismic reflectors and sequence divisions

年代		地震界面 (层序界面)	地震层序 (层序地层)
第 四 纪	全新世	R ₁	SQ1
	晚更新世	SB ₁	SQ2
		R ₂	SQ3
	中更新世晚期	SB ₂	SQ4
	中更新世早期	R ₃	SQ5
		SB ₃	SQ6
早更新世晚期	R ₄		
早更新世中期	SB ₄		
	R ₅		
	SB ₅		
早更新世早期	R ₆		
早更新世早期	SB ₆		

本区 SB₆、SB₅、SB₄、SB₃、SB₂ 和 SB₁ 等 6 个界面均为下切侵蚀面, 分别位于 R₆、R₅、R₄、R₃、R₂ 和 R₁ 界面之下(图 2)。这些界面最为显著的特征是发育密集的下切河道, 河道形态多数呈“U”型或“V”型, 与下覆前积构型反射呈明显的顶超、削截关系, 多形成于陆上侵蚀暴露时期, 为河道下切作用所致。

3.2 层序地层格架

以三级层序界面作为区域标准界面, 利用包括海底(称为 R₀)在内的 7 个界面(含 R₁、R₂、R₃、R₄、R₅、R₆)将第四系上部地层划分为 6 个沉积层序(图 2), 由上至下依次命名为层序 1(R₁—R₀)简称 SQ1, 层序 2(R₂—R₁)简称 SQ2, 层序 3(R₃—R₂)简称 SQ3, 层序 4(R₄—R₃)简称 SQ4, 层序 5(R₅—R₄)简称 SQ5, 层序 6(R₆—R₅)简称 SQ6(表 2, 图 2)。

4 陆架坡折带类型与迁移演化及成因

4.1 第四纪陆架坡折带类型划分

经分析认为, 南海北部海域中、东段三个陆缘区由西至东分别属于沉积型陆缘、侵蚀型陆缘和构造主控型陆缘。不同的陆缘类型, 所对应的陆架坡折也会有差别。其中, 珠江口外陆缘区对应为建设型陆架坡折; 东沙陆缘区对应为侵蚀型陆架坡折; 台湾浅滩陆缘区对应为边缘隆起-断层型陆架坡折, 属于转换型中的一个亚型(图 4)。南海北部海域中、东段各陆架坡折类型特征分述如下:

4.1.1 建设型陆架坡折

如图 5a 所示, 建设型陆架坡折主要分布于本区的西南侧(靠近珠江入海口的的位置), 即珠江口外陆缘区。地震剖面上表现为陆架坡折的向前快速推

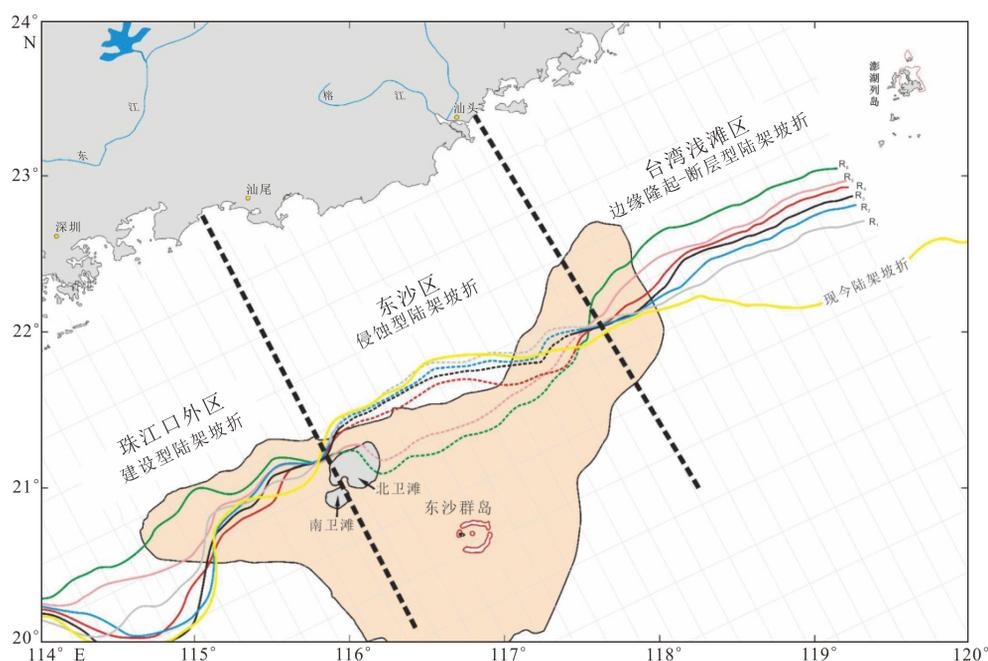


图 4 南海北部海域中、东部陆架坡折类型划分与迁移演化

Fig.4 Shelf break types in the middle and east part of the northern South China Sea

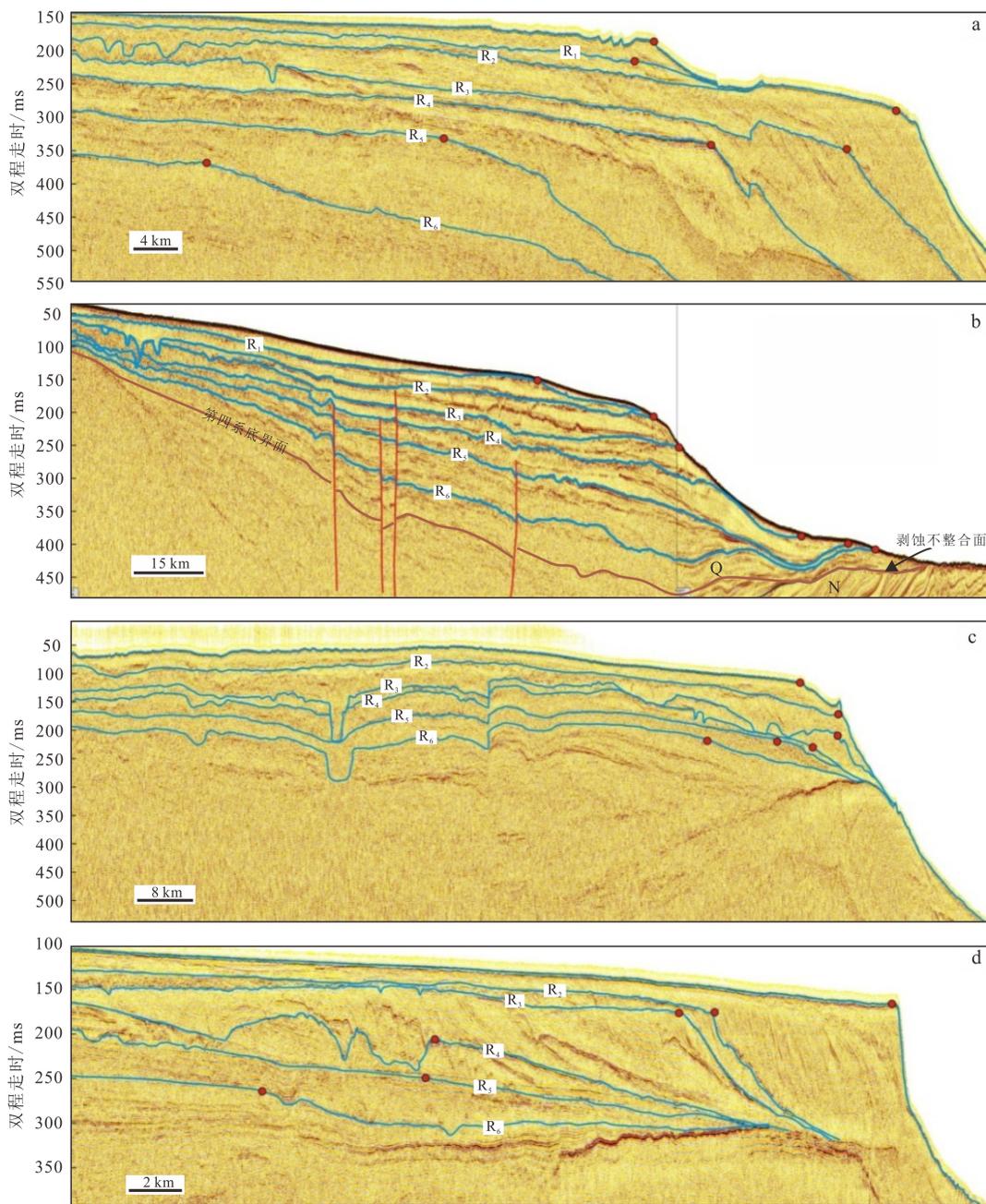


图5 不同位置地震剖面，示陆架坡折类型
测线位置见图1。

Fig.5 Seismic profiles at different locations showing shelf break types

进和斜坡地形(即前积构型反射)的生长。随着时间的推移,斜坡地形规模逐渐增大,坡度增加,并逐步到达陆架边缘,使陆架边缘生长,坡折线向海迁移。

4.1.2 侵蚀型陆架坡折

侵蚀型陆架坡折如图5b所示,主要发育在北卫滩-东沙岛附近区域。这种类型的陆架坡折是由于水动力作用强度大于沉积物的供给能力,造成陆缘逐步侵蚀退积而形成的(图4,图5b)。此外,该区由于构造作用造成抬升也是形成侵蚀型陆架坡折的因素之一。

4.1.3 边缘隆起-断层型陆架坡折(转换型)

边缘隆起-断层型陆架坡折(图5c,图5d)主要分布于台湾浅滩地区,其最大的特征是陆架坡折的位置明显受到基底隆起或者隐伏断裂的控制(图5c),但是当沉积物供给速率明显增加时,后期的陆架坡折可以平衡基底构造的控制作用而使陆架边缘生长(图5d)。但与建设型陆架坡折相比,生长幅度较小。

4.2 第四纪陆架坡折带迁移特征

在上述第四系划分的基础上,利用高精度单道

地震剖面上所显示的陆架坡折转折点(图5中红点所示)和地震反射特征,将不同时期的陆架坡折位置在平面上进行追踪,编绘出南海北部海域中、东部陆架坡折带的演化图(图4),得到陆架坡折的平面展布及演化规律。

其中珠江口外陆架坡折总体上从早更新世起不断向海方向推进,其在各时期最大推进距离分别为:早更新世中期(R_6-R_5)30.17 km,早更新世晚期(R_5-R_4)44.22 km,中更新世早期(R_4-R_3)11.10 km,中更新世晚期(R_3-R_2)8.94 km,晚更新世(R_2-R_1)12.07 km,全新世(R_1 —现今陆架坡折)24.32 km。同时,在珠江口外陆架坡折随时间迁移较为复杂,部分时间出现陆架坡折向陆退缩,晚更新世(R_2-R_1)最大退缩距离达22.06 km。

东沙陆架坡折总体上从早更新世起不断向陆地方向退却,其在各时期最大退缩距离分别为:早更新世中期(R_6-R_5)7.97 km,早更新世晚期(R_5-R_4)34.59 km,中更新世早期(R_4-R_3)17.85 km,中更新世晚期(R_3-R_2)4.81 km,晚更新世(R_2-R_1)5.28 km;全新世(R_1 —现今陆架坡折)6.03 km。同时,在东沙东端由于靠近台湾浅滩区,陆架坡折随时间迁移较为复杂,部分时间出现陆架坡折向海推进,全新世(R_1 —现今陆架坡折)向海推进最大距离达15.48 km。

台湾浅滩陆架坡折从早更新世起不断向海方向推进,其在各时期最大推进距离分别为:早更新世中期(R_6-R_5)14.40 km,早更新世晚期(R_5-R_4)15.30 km,中更新世早期(R_4-R_3)7.04 km,中更新世晚期(R_3-R_2)14.19 km,晚更新世(R_2-R_1)13.36 km,全新世(R_1 —现今陆架坡折)48.46 km。

4.3 第四纪陆架坡折带迁移的成因

南海北部陆坡具有很强的横向变化性^[19],不同陆坡类型与各陆坡区所对应的构造背景、沉积物供给、海平面变化、海洋作用、重力滑塌和陆架边缘三角洲进积等因素密切相关。有些因素是作用于全区的,如海平面变化作用等,但在各个陆坡区的作用强度具有明显的差异性。而对于不同的陆坡类型或陆坡区,主控因素通常不同。下文对主要作用于本区陆架坡折带迁移的各控制因素加以分析。

4.3.1 构造对陆缘地貌的控制

构造背景通常是陆坡形态的一级控制因素,因此,构造作用在一定程度上决定了陆坡的长度、高度和起伏特征,从而基本控制了陆坡外形轮廓和发育演化规模。

东沙陆坡及台湾浅滩陆架、陆坡区受构造活动的控制较为明显。晚第四纪东沙隆起发生了强烈的构造运动,整体处于持续的抬升阶段,使该区难以形成向海逐渐倾斜的“台阶式”基底格局(图5b)。单道地震剖面显示,第四系底界面之上地层在隆起区被剥蚀,下伏地层受挤压发生扭动形变与掀斜,顶部受强烈剥蚀,形成角度不整合接触,新近纪—第四纪地层均遭受强烈抬升、褶皱和剥蚀作用,以致该区缺失第四系和新近系上部地层(图5b),说明该区在上新世末及第四纪末发生过两期强烈的构造运动。因此,东沙群岛附近海域台地持续隆起,沉积物难以堆积,形成陆架坡折带不断向陆一侧迁移的形态。而台湾浅滩陆架、陆坡区经历了古近纪的裂陷作用及渐新世末期的挤压作用,发育了一系列的逆冲断层和反转构造,形成较为复杂的基底构造形态,成为构造控制型陆缘。

4.3.2 水下河道发育与海平面变化

埋藏水下河道大量发育是本区地震剖面的一大特点。水下河道的发育一定程度上与海平面变化有关。河道增加对应于海平面下降,河道可向海方向推进;河道减少对应于海平面上升,河道萎缩向岸方向后退,二者关系密切。

(1) 水下河道识别

在高精度单道地震剖面中,可识别出丰富的反映水下河道的前积反射相、下切充填相、杂乱反射相等地震相类型,以及下切河谷及河道的构型。

剖面识别中,下切谷充填地震相显示为中间呈“U”形或“V”形下切,向两侧为平台状两翼,呈平行、亚平行结构,外部为强振幅边界,内部可表现为对称或不对称的向心状反射或强振幅杂乱反射等。虽然以强振幅为主,但是个别情况下也可以表现为弱振幅,总体为高频、中连续。反映出水动力非常强,水道成片分布,并且多期水道叠置发育。若侵蚀水道的“U”形或“V”形范围沉积物充填满后向两侧溢出,则显示为该水道两侧的平直“两翼”,外形呈“海鸥翼”,形成水道—天然堤岸复合沉积体。

本次研究发现,珠江河口—陆架区第四系内发育多种类型的下切充填,其中位于最上方的SB1界面发育有最为密集的下切河谷,推测与末次盛冰期(LGM)海平面大幅下降有关。这些下切河谷多以多期复合充填^[20](compound或multistory)的内部充填方式发育。

图6为研究区西北部的一条北东向地震剖面,展示了近岸位置的大型复合下切河谷,宽度超过20 km(应注意地震剖面不是恰好垂直河谷而是与河谷斜

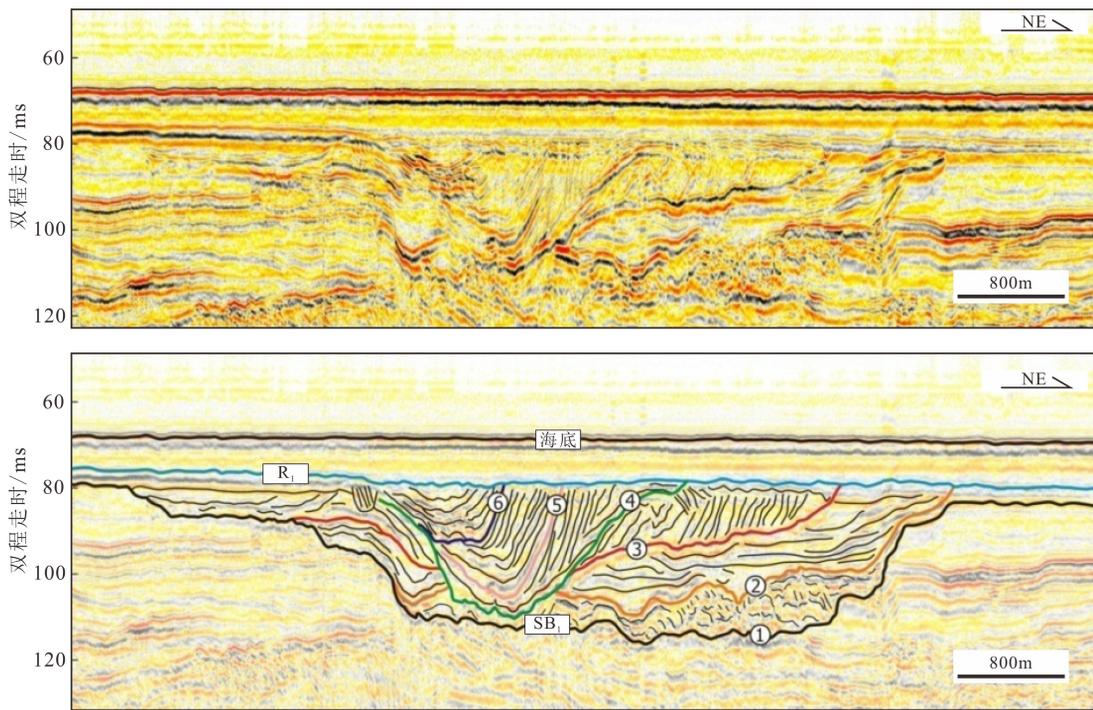


图6 地震剖面选段
示内陆架区复合下切河谷, 测线位置见图1。

Fig.6 A selected seismic profile showing a compound incised valley on inner shelf

切的情况下, 剖面展示的下切河谷宽度比实际的河谷宽度大, 而且其宽度的大小与斜切的角度有关, 最大深度超过 30 m。其内部充填以多期河道下切为主, 而明显缺少弱振幅的海侵泥岩段。这表明河道发育区主要受到了河流控制。通过精细的地震相分析发现该大型下切河谷至少发育过 6 期下切。推测这些下切作用与高频海平面升降旋回(5 次或

以上)有关。

(2) 水下河道发育特征

应用本文所解释的 6 条下切侵蚀界面, 在对每条主测线和联络线出现的下切河道进行追踪后, 利用相似性原则在平面上进行组合, 解释了第四纪河道的发育和演化特征, 得到 SQ6—SQ1 各层序下切河道的平面分布(图 7)。

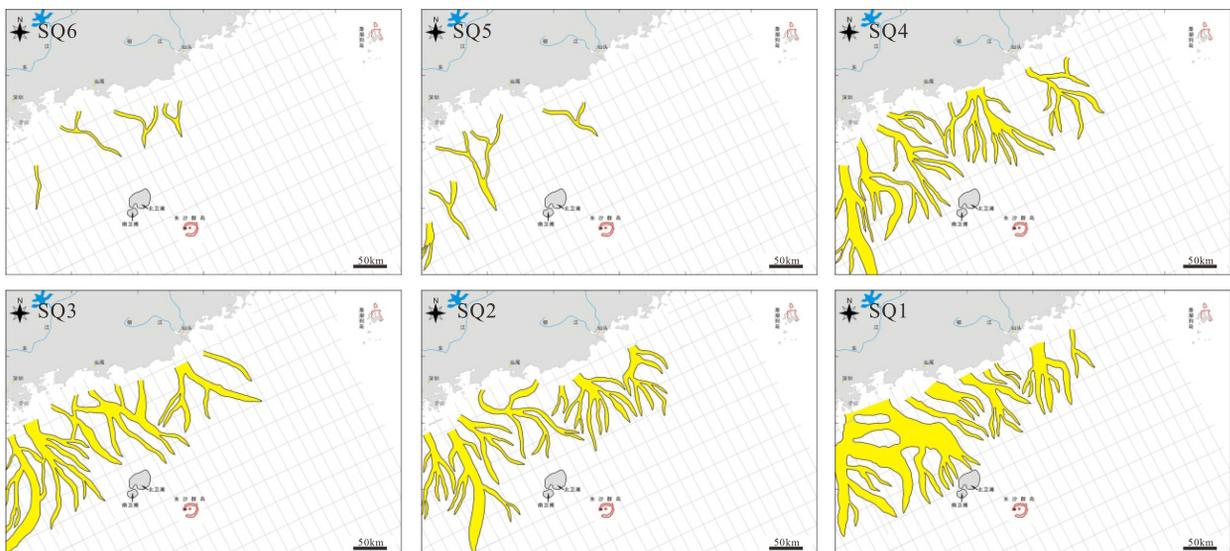


图7 南海北部海域东段第四系水下河道的变迁

Fig.7 Distribution of Quaternary incised valleys in the east part of the northern South China Sea

SQ6 层序的低位期发育少量下切河谷(或者为古河道, 以下同), 主要分布于内陆架地区, 说明当时海平面相对较高。SQ5 发育时期, 下切河道数量与 SQ6 时期相比稍微增多, 发育了一些河道体系, 但是总体数量仍然较少, 分布位置更加向海推进。SQ4 沉积期下切谷大量发育, 比下覆 SQ6 和 SQ5 两层序的河谷数量大大增加, 二者形成了鲜明的对比。下切河谷体系呈分支状向外散开, 暗示本期的下切河道具有很强的输送沉积物的能力。SQ3 沉积期整体上保持了与 SQ4 层序相类似的沉积特征, 下切河谷体系依然大规模发育, 河道宽度进一步加大, 三角洲主体部位在西南部占据更大面积。SQ2 层序同样以大型下切河谷体系为主要特征, 河道的宽度有所缩小, 分布范围略为朝岸线退缩, 暗示此时的海平面有所上升。SQ1 层序发育时期大体相当于末次冰期, 发育的下切河谷体系规模明显增加, 河道宽度迅速增大, 主体部位同样位于西南侧, 但是河道向海延伸范围有所退缩(图 7)。

(3) 海平面变化与河道变迁

海平面的变化通常伴随着浪底作用深度的改变, 其上升或下降将导致陆坡偏离“均衡”状态, 触发调整作用^[21], 形成滑动、滑塌及块状搬运等重力流过程, 进而对陆缘形态产生影响。

以珠江口外区为例, R_1 时海平面下降, 陆架区河道发育, 陆架坡折带向陆迁移; R_4 时海平面上升, 河道数量减少, 陆架坡折带朝海迁移(图 3、图 7)。低位期海平面可下降至陆架坡折之下, 陆架暴露遭受侵蚀, 使陆坡区更易发生改造作用。当陆架坡折与波浪破碎带位于大致相同的基面时, 尽管有较多径流供给, 但波浪的频繁活动使沉积物无法在陆架坡折带沉积, 而是被波浪或重力滑塌等原因搬运至陆坡脚甚至更远的区域(图 8a), 形成陆缘三角洲进积作用^[22]。也就是说, 海平面下降, 沉积物朝陆坡搬运的作用大于在陆架边缘的沉积作用时, 陆架坡折带不断遭受侵蚀而向陆迁移, 尽管陆架有大量河道发育, 但沉积物大多被搬运至陆坡深水区。反之, 海平面上升, 河道搬运而来的物质基本上全部在陆架上沉积, 塑造陆架坡折带, 使之往海方向迁移(图 8b)。

4.3.3 气候控制与沉积速率

由于不同植被类型覆盖的陆架平原抵抗侵蚀的能力不尽相同, 气候控制下的陆架植被类型也是影响陆架坡折迁移演化的主要原因之一。南海北部 ODP1144 井的植物孢粉演化表明 0.6 Ma 之后南海北部陆架区植被以草原为主, 代表了较为干旱的气候环境^[23], 以草本植被为主的陆架平原一般易于

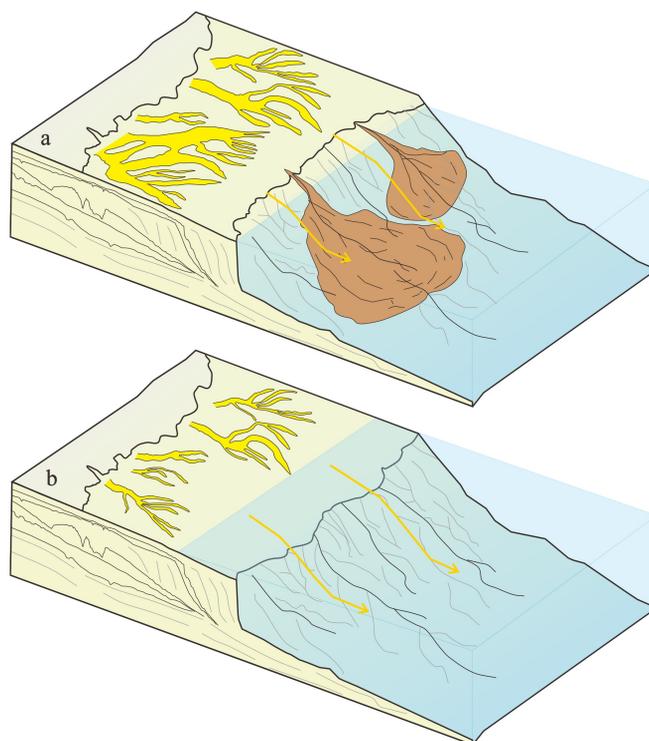


图 8 海平面变化导致坡折线迁移对比示意图

a. 海平面下降, b. 海平面上升。

Fig.8 Comparison of the migration of shelf-break caused by sea level change

形成河道下切现象。而 0.6 Ma 之前南海北部气候相对湿润, 叶子植被茂密, 因此抵抗河道侵蚀的能力更强。一般情况下, 炎热干旱的气候环境极易造成沉积物的风化剥蚀, 导致搬运入海的沉积物增

加, 形成海区更高的沉积速率而使陆架坡折带朝海迁移; 反之, 气候温暖潮湿, 茂密的树林等植被发育, 沉积物不易被风化剥蚀, 搬运入海的沉积物减少, 沉积速率显著降低(图 9), 使陆架坡折带朝陆迁移。

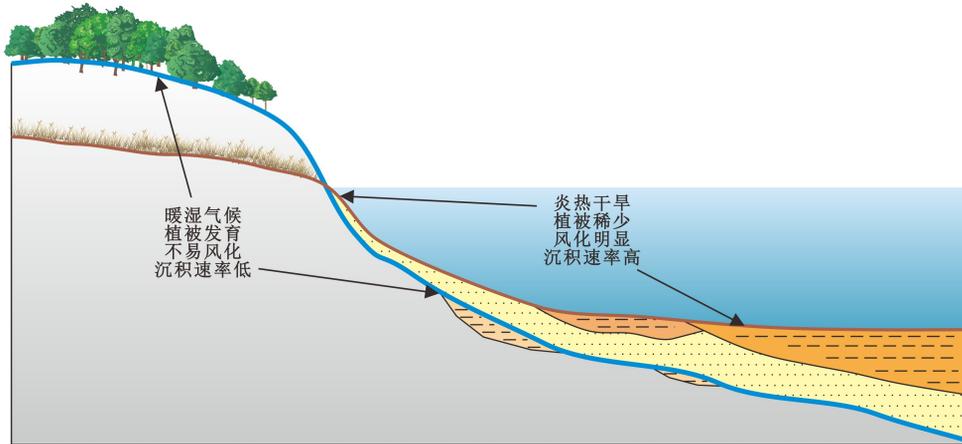


图 9 气候变化导致沉积速率差异对比示意图

Fig.9 Comparison of the difference in sedimentation rate caused by climate change

5 结论

(1)南海北部海域中、东部珠江口外区、东沙区和台西南区的陆架、陆坡一带的第四纪地层中发育了 6 个三级层序界面(自上而下为 $R_1—R_6$), 和 6 个下切侵蚀面(自上而下为 $SB_1—SB_6$)。相应地可划分出 SQ1—SQ6 六个层序, 自上而下为全新世、晚更新世、中更新世晚期、中更新世早期、早更新世晚期、早更新世中期; 以 6 个下切侵蚀面的解释为基础分析了本区第四纪河道的发育演化特征。

(2)本区具有 3 种不同的陆架坡折带类型: 珠江口外区为建设型陆架坡折, 该陆架坡折迁移特征总体上从早更新世起不断往海方向推进, 部分时间因海平面下降、陆架边缘被侵蚀而导致沉积物被搬运至远处而出现陆架坡折向陆退缩; 东沙区基本上一直为水动力较强的区域, 加之构造作用, 易造成侵蚀, 为侵蚀型陆架坡折, 该陆架坡折迁移特征总体上从早更新世起不断往陆地方向退却; 台湾浅滩区为边缘隆起-断层型陆架坡折, 该陆架坡折迁移特征从早更新世起不断往海方向推进, 但推进幅度不大。

(3)影响南海北部海域中、东部陆架坡折带迁移演化的主要因素包括构造控制作用、受海平面变化影响的水下河道演化导致不同的沉积侵蚀作用、受气候影响的沉积物堆积速率等。

参考文献 (References)

- [1] Vail P R, Mitchum R M, Todd R G, et al. Seismic stratigraphy and global changes of sea level[M]//Payton C E. Seismic Stratigraphy: Applications to Hydrocarbon Exploration. Tulsa: AAPG Publishing Bureau, 1977: 49-212.
- [2] Van Wagoner L C, Posamentier H W, Mitchum R M, et al. An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions[M]//Wilgus C K. Sea-Level Changes: An Integrated Approach. Tulsa: SEPM, 1988.
- [3] Hedberg H D. Continental margins from viewpoint of the petroleum geologist [J]. AAPG Bulletin, 1970, 54(1): 3-43.
- [4] 林畅松, 潘元林, 肖建新, 等. “构造坡折带”: 断陷盆地层序分析和油气预测的重要概念[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2000, 25(3): 260-266. [LIN Changsong, PAN Yuanlin, XIAO Jianxin, et al. Structural slope-break zone: key concept for stratigraphic sequence analysis and petroleum forecasting in Fault Subsidence Basins [J]. Earth Science——Journal of China University of Geosciences, 2000, 25(3): 260-266.]
- [5] 姚伯初, 万玲, 刘振湖. 南海海域新生代沉积盆地构造演化的动力学特征及其油气资源[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2004, 29(5): 543-549. [YAO Bochu, WAN Ling, LIU Zhenhu. Tectonic dynamics of cenozoic sedimentary basins and hydrocarbon resources in the South China Sea [J]. Earth Science——Journal of China University of Geosciences, 2004, 29(5): 543-549.]
- [6] 谢玉洪, 王振峰, 解习农, 等. 莺歌海盆地坡折带特征及其对沉积体系的控制[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2004, 29(5): 569-574. [XIE Yuhong, WANG Zhenfeng, XIE Xinong, et al. Patterns of slope-break zone and their depositional models in the Yinggehai Basin [J]. Earth Science——Journal of China University of

- Geosciences, 2004, 29(5): 569-574.]
- [7] 李思田, 潘元林, 陆永潮, 等. 断陷湖盆隐蔽油藏预测及勘探的关键技术: 高精度地震探测基础上的层序地层学研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2002, 27(5): 592-598. [LI Sitian, PAN Yuanlin, LU Yongchao, et al. Key technology of prospecting and exploration of subtle traps in Lacustrine Fault Basins: sequence stratigraphic researches on the basis of high resolution seismic survey [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(5): 592-598.]
- [8] 王英民, 金武弟, 刘书会, 等. 断陷湖盆多级坡折带的成因类型、展布及其勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(3): 199-203, 214. [WANG Yingmin, JIN Wudi, LIU Shuhui, et al. Genetic types, distribution and exploration significance of multistage slope breaks in Rift Lacustrine Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(3): 199-203, 214.]
- [9] 庞雄, 陈长民, 邵磊, 等. 白云运动: 南海北部渐新统-中新统重大地质事件及其意义[J]. 地质论评, 2007, 53(2): 145-151. [PANG Xiong, CHEN Changmin, SHAO Lei, et al. Baiyun movement, a great tectonic event on the Oligocene-Miocene boundary in the Northern South China sea and its implications [J]. Geological Review, 2007, 53(2): 145-151.]
- [10] 黄胜兵, 叶加仁, 朱红涛, 等. 渤中西环古沟谷与坡折带特征及其对储层的控制[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(1): 119-124. [HUANG Shengbing, YE Jiaren, ZHU Hongtao, et al. Characteristics of valley-slope break zone in the Western Circle of the Bozhong depression and its control over reservoir distribution [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31(1): 119-124.]
- [11] 王永凤, 王英民, 李冬, 等. 珠江口盆地坡折带特征及其对沉积体系的控制[J]. 沉积与特提斯地质, 2011, 31(3): 1-6. [WANG Yongfeng, WANG Yingmin, LI Dong, et al. Characteristics of the slope break zones and their controls on the depositional systems in the Pearl River Mouth Basin [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2011, 31(3): 1-6.]
- [12] 田姗姗, 苏明, 何云龙, 等. 琼东南盆地新近系坡折带特征及其对沉积体系的控制[J]. 科技导报, 2010, 28(10): 73-78. [TIAN Shanshan, SU Ming, HE Yunlong, et al. Patterns of Neogene slope-break zones and the depositional system under their control in Qiongdongnan Basin [J]. Science & Technology Review, 2010, 28(10): 73-78.]
- [13] 肖军, 王华, 陆永潮, 等. 琼东南盆地构造坡折带特征及其对沉积的控制作用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(3): 55-63. [XIAO Jun, WANG Hua, LU Yongchao, et al. Characteristics of structural slope-break zone and its controlling effect on sediment in the Qiongdongnan Basin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2003, 23(3): 55-63.]
- [14] 赵忠新, 王华, 陆永潮. 断坡带对沉积体系的控制作用: 以琼东南盆地为例[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(1): 25-27. [ZHAO Zhongxin, WANG Hua, LU Yongchao. Controlling role of fault-break zones on sedimentary system: taking Qiongdongnan basin as an example [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(1): 25-27.]
- [15] 陈泓君, 詹文欢, 温明明, 等. 南海西北部琼东南盆地陆架坡折带类型及沉积作用特征[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(8): 1-9. [CHEN Hongjun, ZHAN Wenhuan, WEN Mingming, et al. Characteristics of shelf break and sedimentation process at the Qiongdongnan Basin, Northwestern South China Sea [J]. Marine Geology Frontiers, 2015, 31(8): 1-9.]
- [16] Tesson M, Posamentier H W, Gensous B. Stratigraphic organization of late Pleistocene deposits of the western part of the Golfe du Lion shelf (Languedoc shelf), Western Mediterranean Sea, using high-resolution seismic and core data [J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(1): 119-150.
- [17] Lobo F J, Ridente D. Stratigraphic architecture and spatio-temporal variability of high-frequency (Milankovitch) depositional cycles on modern continental margins: an overview [J]. Marine Geology, 2014, 352: 215-247.
- [18] Labaune C, Tesson M, Gensous B. Variability of the transgressive stacking pattern under environmental changes control: Example from the Post-Glacial deposits of the Gulf of Lions inner-shelf, Mediterranean, France [J]. Continental Shelf Research, 2008, 28(9): 1138-1152.
- [19] 吴时国, 秦蕴珊. 南海北部陆架深水沉积体系研究[J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 922-930. [WU Shiguo, QIN Yunshan. The research of deepwater depositional system in the Northern South China Sea [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5): 922-930.]
- [20] 栾锡武, 彭学超, 王英民, 等. 南海北部陆架海底沙波基本特征及属性[J]. 地质学报, 2010, 84(2): 233-245. [LUAN Xiwu, PENG Xuechao, WANG Yingmin, et al. Characteristics of sand waves on the Northern South China sea shelf and its formation [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(2): 233-245.]
- [21] Ross W C, Halliwell B A, May J A, et al. Slope readjustment: a new model for the development of submarine fans and aprons [J]. Geology, 1994, 22(6): 511-514.
- [22] 聂鑫, 彭学超, 杜文波. 南海北部陆架第四系边缘三角洲地震反射特征[J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(1): 19-26. [NIE Xin, PENG Xuechao, DU Wenbo. Seismic facies of quaternary shelf-margin deltas in Northern South China Sea [J]. Marine Geology Frontiers, 2017, 33(1): 19-26.]
- [23] Sun X J, Luo Y L, Huang F, et al. Deep-sea pollen from the South China Sea: Pleistocene indicators of East Asian monsoon [J]. Marine Geology, 2003, 201(1-3): 97-118.