



调查成果 CGS2017-028

邻域构造演化研究 GZH201100205

南海北部海域

第四系侵蚀过程与沉积响应

◎ 邱燕 彭学超 王英民 黄文凯 杜文波 等著

地质出版社

地质调查成果 CGS2017 - 028

海及邻域构造演化研究 GZH201100205

南海北部海域 第四系侵蚀过程与沉积响应

邱 燕 彭学超 王英民 黄文凯 杜文波
陈泓君 卓海腾 郑志昌 欧阳婷萍 著
吴时国 朱本铎 聂 鑫 龚承林

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书以南海北部陆架-陆坡-深海盆不同地貌区发育的第四系为研究对象,将海岸平原、陆架、陆坡作为一个统一体来研究。依据不同类型的沉积相和沉积体系的平面展布及垂向演化特征,分析了陆源碎屑沉积物在陆架、陆坡、陆隆和深海平原中的扩散状况和沉积规律,以及陆源碎屑沉积物向海盆输送的侵蚀特征和控制因素,同时深入研究了南海北部海域第四系侵蚀过程与沉积响应。提出南海北部陆坡深水区普遍发育浊流和等深流沉积,具有形成大型油气圈闭的优越条件。这些认识对于南海北部陆架,尤其是陆坡-深水区的石油勘探无疑具有重要的指导意义和参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

南海北部海域第四系侵蚀过程与沉积响应 / 邱燕等
著. —北京:地质出版社, 2017. 7
ISBN 978 - 7 - 116 - 10100 - 5

I. ①南… II. ①邱… III. ①南海-海岸地貌-第四系-海洋-沉积-研究 IV. ①P737.172

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 326679 号

Nanhai Beibu Haiyu Disixi Qinshi Guocheng Yu Chenji Xiangying

责任编辑: 韩 博 白 铁 肖峻文 于春林
责任校对: 王素荣
出版发行: 地质出版社
社址邮编: 北京市海淀区学院路 31 号, 100083
电 话: (010) 66554528 (邮购部); (010) 66554625 (编辑室)
网 址: <http://www.gph.com.cn>
传 真: (010) 66554686
印 刷: 北京地大彩印有限公司
开 本: 889 mm × 1194 mm ¹/₁₆
印 张: 12.5
字 数: 400 千字
版 次: 2017 年 7 月北京第 1 版
印 次: 2017 年 7 月北京第 1 次印刷
审 图 号: GS (2017) 1406 号
定 价: 60.00 元
书 号: ISBN 978 - 7 - 116 - 10100 - 5

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

序

随着全球对海域深水油气勘探开发兴趣的日益增长以及高质量地震数据的广泛获取，海洋陆架和陆坡深水沉积环境及侵蚀过程与沉积响应的研究已经成为当前沉积学研究的热点和前缘领域。

陆域和海洋浅水陆架是陆缘碎屑物质的短期储存场所，陆坡是联接陆架并向深海输送碎屑物质的中间环节，陆隆和深海平原是碎屑物质的最终储存地。重要的是，陆坡还是曾经在陆架短暂沉积的碎屑物质再分散、再搬运、再分选和再沉积的关键部位，也是各种水动力机制和沉积现象最活跃、最丰富的场所部位。

陆坡深水区沉积物的侵蚀过程与沉积响应研究成为当前深水沉积学研究的热点和前缘领域的主要原因是：其一，许多陆坡深水区已经成为油气勘探的重要组成部分，陆坡深水体系中发育的重力流和等深流地质体是深水区的主要储层，也是寻找大型、巨型油气藏（田）最有利的目标；其二，陆坡深水区大量的沉积物是从陆架或上陆坡经由重力流搬运而形成的深水沉积体；其三，这些区域所伴生的大规模重力流事件可能对深水勘探井产生严重的破坏作用，因而是深水钻井风险评估研究的核心内容。此外，陆架边缘斜坡地形高度的差别，越过陆架边缘分配到深水陆坡区的砂体体积规模，陆架、陆坡地形生长方式等，均对深水油气勘探具有重要的意义，因而需要定性乃至定量地加以研究。

本书作者正是本着为海洋油气勘探服务这一宗旨，深入分析研究了南海北部海域第四系侵蚀过程与沉积响应。本书对南海北部陆坡分段的认识颇有创新，将其分为5个不同类型的陆坡段而加以研究，并提出南海北部陆坡深水区普遍发育浊流和等深流沉积，具有形成大型油气圈闭的优越条件。这些认识对于南海北部陆架，尤其是陆坡—深水区的石油勘探无疑具有重要的指导意义和参考价值。

作为一名老地质工作者，十分赞赏作者的敬业精神和精益求精的科学态度。值此成果付梓出版之际，特作序以志贺。

中国科学院院士



2017年2月 于北京

前 言

长期以来的石油勘探规律表明,不少海洋油气发现均分布在现今水深 200m 附近,此处恰好是全球陆架坡折的平均水深。陆壳和洋壳厚度不同而导致的均衡调整作用,可使陆架坡折处的沉积速度大于陆架的沉积速度,因而导致此处沉积物厚度大,使之有利于有机质的成熟和生烃。

南海北部海域发育了宽阔的陆架、地形地貌多变而复杂的陆坡、不甚明显的陆隆和平坦的深海平原。浅水陆架环境以潮汐和波浪为主要营力。更为重要的是,深水(峡谷、陆坡和盆地)环境则以各种重力流(滑动、滑塌、颗粒流、碎屑流和块状搬运沉积)、底流(等深流、溢流)沉积为特色,故而该区具有形成大型油气田和油气圈闭的优越条件。如此可见,沉积物的侵蚀过程与沉积响应及其主控因素的研究是海域油气勘探过程的关键一环。

本书利用海洋地质-地球物理调查资料和钻探岩心资料,以及多波束测深系统获得的高精度海底地形资料等,以南海北部陆架-陆坡-深海盆不同地貌区发育的第四系为研究对象,将海岸平原、陆架、陆坡作为一个统一体来研究。依据不同类型的沉积相和沉积体系的平面展布及垂向演化特征,分析碎屑沉积物在海洋中的扩散状况和沉积规律,以及陆源碎屑沉积物向海盆输送的侵蚀特征和控制因素,讨论重力流、底流的活动特征及交互作用;同时辅助以沉积相的精细划分,刻画不同沉积体的形态和类型的空间展布,揭示地形、坡度、陆架水体活动和陆架坡折带的迁移特征,建立重点区域从陆架、陆坡到海盆的第四系层序地层格架,进而深入研究南海北部陆坡深水体系的侵蚀-沉积响应过程、机理和主控因素。

本书编写分工:

前言由邱燕编写;

第一章第一节由邱燕编写,第二节由朱本铎编写,第三节由卓海腾编写,第四节由邱燕、卓海腾编写;

第二章由欧阳婷萍、杜文波编写;

第三章第一节由王英民编写,第二节由陈泓君、彭学超、邱燕、黄文凯编写,第三节由邱燕编写,第四节由黄文凯编写,第五节由王英民、龚承林编写,第六节由邱燕编写;

第四章由邱燕、龚承林编写;

第五章第一节由卓海腾编写;第二节、第三节由邱燕、吴时国编写;

第六章第一节由卓海腾、邱燕、彭学超编写;第二节由邱燕、卓海腾编写,第三节

由卓海腾、彭学超、王英民、聂鑫编写，第四节由邱燕编写；

第七章第一节、第三节、第四节由邱燕编写；第二节由卓海腾编写；

第八章由龚承林、王英民编写；

第九章由郑志昌编写。

全书由邱燕、郑志昌统稿，杜文波负责汇总、修饰所有插图，黄文凯、聂鑫编制部分插图，郑志昌负责全书三校审稿。

在本书的研究过程中，李廷栋院士、张洪涛、杨胜雄、何高文、郑涛、刘振湖、周昌范、杨文达、刘守全、周才凡、戴春山、张训华、郭洪周、张志珣、温珍河、李唐根、蓝先洪、孟祥君、郭振轩、李良辰、尹延鸿、丛鸿文、郭兴伟等教授或研究员通过年度报告和年度设计评审的形式，提出了许多宝贵意见；在本书编写过程中，作者通过与任纪舜院士、中国地质科学院地质研究所牛宝贵研究员、赵磊副研究员，中山大学陈国能老师、张珂老师、邹和平老师和彭卓伦老师，中国科学院南海海洋研究所刘海龄研究员、阎贫研究员和王彦林博士，中国地质大学（北京）王瑜老师，中国地质大学（武汉）解习农教授、任建业教授和姜涛副教授因其他项目的合作或交流，开通了思路，提高了认识，间接地得到上述老师或专家给予的指导。广州海洋地质调查局黄永样、陈邦彦、姚伯初、钟广见、张莉、高红芳、李学杰、姚永坚等教授给予了热情支持和帮助；此外，广州海洋地质调查局韩冰、钟和贤、汪俊、吕文超、郭丽华、徐子英、王立飞、李顺、薛红、崔娟、李文成、孙桂华、张伙带、黄永健、蔡观强、唐江浪、魏晓、邓慧荣、刘丽强、杨楚鹏、吴蛟岐、黄磊、祝嵩、赵利、鞠东、孙美静等同仁给予大力支持，在此一并谨致衷心谢忱。

目 录

序
前 言

第一章 南海北部海域区域地质背景 (1)

 第一节 南海北部海域周缘陆域地质背景 (1)

 第二节 南海北部海域地貌特征 (3)

 第三节 南海北部海域现今水动力特征 (4)

 第四节 南海北部海域陆坡地貌 (6)

第二章 南海北部海域西段表层沉积与源 - 渠 - 汇过程响应 (9)

 第一节 粒度与矿物特征 (9)

 第二节 主量元素 (15)

 第三节 微量元素 (20)

 第四节 有机地球化学特征 (25)

 第五节 表层沉积物源 - 渠 - 汇过程响应 (31)

 第六节 小 结 (35)

第三章 莺 - 琼盆地第四系侵蚀过程与沉积响应 (36)

 第一节 第四系界面的确定 (36)

 第二节 末次冰期以来高精度层序地层划分 (39)

 第三节 地震相解释 (47)

 第四节 莺 - 琼盆地晚更新世三角洲 (58)

 第五节 莺 - 琼陆坡第四系侵蚀过程与沉积响应 (63)

 第六节 小 结 (70)

第四章 神狐陆坡第四系侵蚀过程与沉积响应 (72)

 第一节 典型重力流体系与侵蚀过程和沉积响应 (73)

 第二节 典型底流体系与侵蚀过程和沉积响应 (76)

 第三节 浊流与底流交互作用及侵蚀过程与沉积响应 (79)

 第四节 小 结 (82)

第五章 珠江 - 白云陆坡侵蚀过程与沉积响应 (83)

 第一节 珠江 - 白云陆坡发育的深水单向迁移水道 (83)

 第二节 珠江 - 白云陆坡海底滑坡 (84)

 第三节 小 结 (92)

第六章 南海北部海域东段第四系沉积相及侵蚀过程与沉积响应 (93)

第一节 层序地层分析 (93)

第二节 第四系沉积相及侵蚀过程与沉积响应 (114)

第三节 南海北部海域东段陆架坡折类型及主控因素 (133)

第四节 小 结 (140)

第七章 台湾浅滩陆架和陆坡第四系侵蚀过程与沉积响应 (141)

第一节 台湾浅滩陆坡地貌特征与主要地貌单元 (141)

第二节 台湾浅滩陆架现今海底沙波特征 (143)

第三节 台湾浅滩陆坡第四系侵蚀过程与沉积响应 (146)

第四节 小 结 (167)

第八章 南海北部陆坡斜坡地形生长方式定量表征 (168)

第一节 陆架边缘斜坡地形的定量刻画 (168)

第二节 陆架边缘斜坡地形的生长方式 (174)

第三节 陆架边缘斜坡生长方式与越过陆架边缘向深水陆坡区分割的砂体规模之间
的关系 (175)

第四节 陆架边缘斜坡生长方式与卸载于陆架边缘和深水陆坡区的沉积物规模之间
的关系 (181)

第五节 不同类型的陆架边缘斜坡地形成因机制 (183)

第九章 侵蚀过程与沉积响应研究的油气勘探意义 (186)

英文摘要 (188)

参考文献 (189)

第一章 南海北部海域区域地质背景

南海北部海域位于 15°~26° N; 105°~122° E, 即从南海西北部的北部湾始至东北部的台湾岛以西、自台湾海峡北到南海黄岩岛链的海域 (图 1-1)。

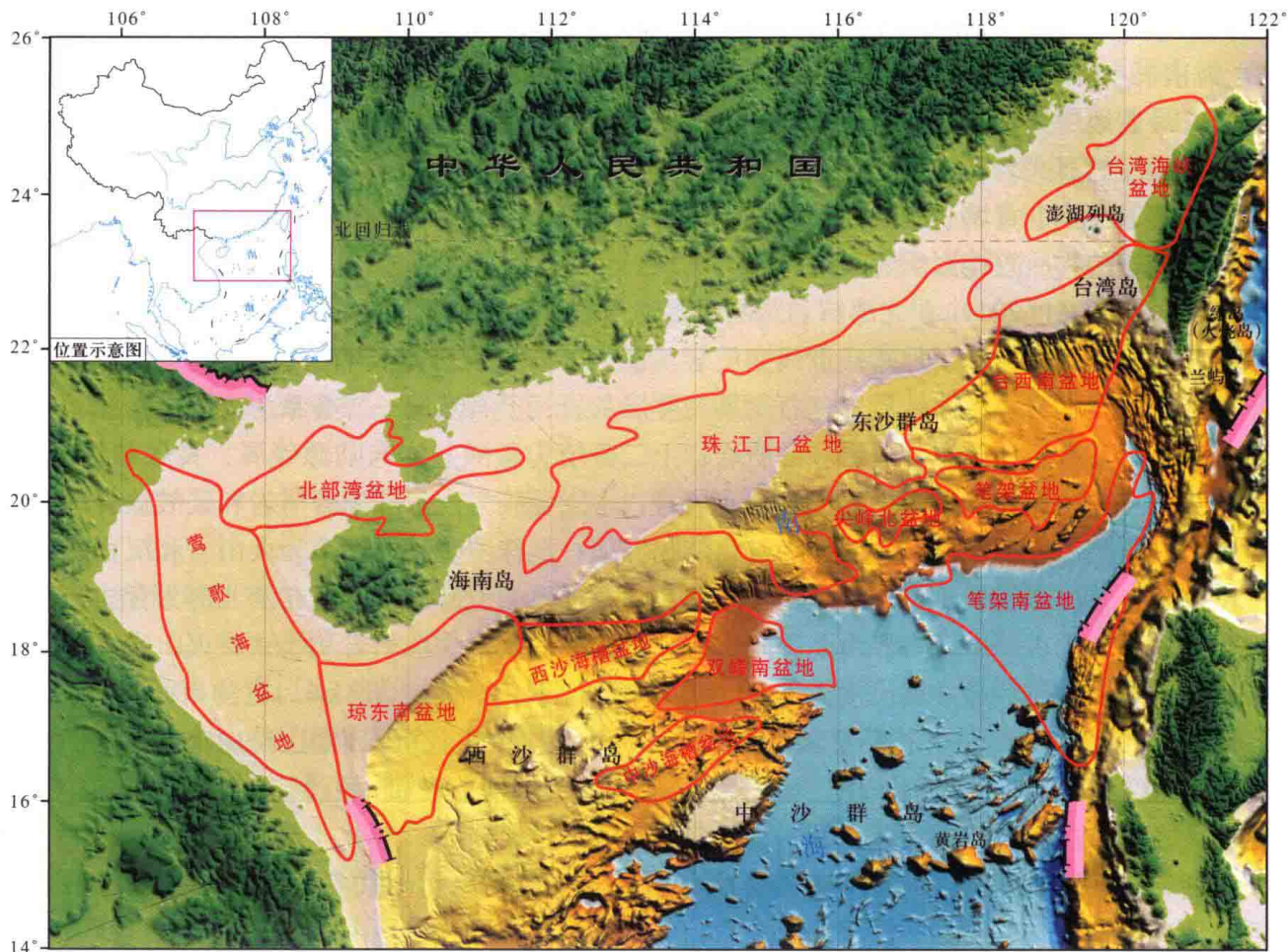


图 1-1 南海北部海域位置与地形特征及盆地分布图
Fig. 1-1 Location and topography of the northern South China Sea and distribution of basins

南海北部海域周缘陆域包括粤桂沿岸陆地、海南岛、台湾岛等区域。这些周缘陆域为南海北部海域的沉积提供了丰富的陆缘碎屑, 无疑是本区重要的沉积物源。陆架海域发育北部湾、莺歌海、琼东南、西沙海槽、珠江口、台西南等陆缘盆地; 陆坡区包含南海北部陆坡和部分西部陆坡; 深海平原大致为黄岩岛链以北的中央海盆部分 (图 1-1)。

第一节 南海北部海域周缘陆域地质背景

分别简单叙述南海北部海域西段和南海北部海域东段周缘陆域的区域地质背景。

一、南海北部海域西段周缘陆域地质背景

广东与广西沿岸陆地 (北部湾北岸) 发育了第四纪松散沉积、火山岩及其风化红土、志留纪变

质岩和泥盆纪碎屑岩以及碳酸盐岩,含少量花岗岩和白垩纪岩石。粤西海岸陆地以发育大量花岗岩类的岩浆岩为特征,含少量古生代变质岩和沉积岩,海岸带主要是砂泥质沉积。来自广东与广西沿岸陆地的陆缘物质直接影响了北部湾海域的沉积。

雷州半岛南部以发育第四纪玄武岩及其红土风化壳为主,局部含第四纪早期湛江组砂、泥质沉积物以及中一晚更新世和全新世的砂质沉积、玛珥湖沉积、海岸沉积和珊瑚礁等。雷州半岛北部以第四纪湛江组、北海组等砂泥质沉积为主,含部分火山熔岩、火山碎屑岩以及大量红土。雷州半岛陆缘的物质侵蚀和搬运也直接影响着本区尤其是北部湾的沉积。

海南岛地势复杂,山地、丘陵、台地、盆地交错分布;从中部山区到四周沿海,可分为山地带、丘陵盆地带、台地阶地平原带。入海的河流均发源于五指山,主要有南渡江、昌化江、万泉河。南渡江向北流入琼州海峡,昌化江向西流入北部湾和莺歌海,万泉河向东流入琼东海域(周祖光,2006)。海南岛中部和南部山地以及丘陵地区以发育花岗岩为主,元古宙至古生代变质岩、砂页岩、灰岩次之,最老地层为中元古代变质岩,少量白垩纪碎屑岩和新近纪与第四纪沉积;北部台地主要为新生代多期喷发的玄武岩和第四纪松散沉积层(沿海不同的海岸阶地、海滩、珊瑚礁等堆积)。土壤类型以砖红壤、红壤、黄壤、燥红土、砂土、滨海盐土和水稻土为主。海南岛陆地被风化、剥蚀、搬运并向四周输送的物质直接影响着其周缘海域沉积。

据施美凤等研究(2011),北部湾和莺歌海盆地西侧的中国和越南沿岸陆地出露最老地层为新太古代片麻杂岩,被新元古代一早寒武世浅变质岩(二云片岩)、片麻岩和石英岩所覆盖。寒武系为云母-石英-绿泥石片岩和超镁铁质岩;石炭系为厚层灰岩;上石炭统一二叠系为火山-陆源、碳酸盐岩建造,局部为玄武岩夹陆源碎屑岩和硅质岩;上二叠统为碳酸盐岩与陆源碎屑、夹煤和铝土矿层;上二叠统一下三叠统为镁铁质火山岩夹陆源碎屑岩,中三叠统为浅水陆源碎屑岩和碳酸盐岩;上三叠统为含煤磨拉石陆源碎屑沉积;侏罗系为红色陆相沉积;上侏罗统一白垩系为火山岩和沉积岩,火山岩为中酸性岩;上白垩统属于侏罗系-白垩系红色陆相层序的上部沉积,仅在西北部为含盐红色陆相沉积。在红河下游,古一中元古界由陆源碎屑、少量碳酸盐岩的变沉积岩和镁铁质火山岩组成,沿红河断裂带分布有镁铁质和超镁铁质侵入体。红河三角洲位于一个长约500 km,宽约50~60 km的NW-SE向新近纪沉积盆地中,并被前寒武纪结晶岩和古生代至中生代沉积岩组成的山脉所包围。NW-SE向延伸的红河断裂系统控制了山地和沉积盆地的分布,红河断裂带沿红河进入北部湾并直通莺歌海盆地。

王国芝等(2000)对比了莺歌海盆地新生代沉积与滇西高原新生代盆地沉积,指出莺歌海盆地与滇西高原内部盆地具有明显的构造响应关系,二者基本保持同步构造沉降,由此推论滇西高原隆升具有多阶段性和间歇性,其快速隆升期对应于莺歌海盆地的堆积与沉降峰期、高原盆地的剥蚀期以及剥蚀区物源供给高速期。这说明青藏高原隆升-青藏周边高原和地块活动-边缘海活动-南海海盆活动等一系列陆、海构造活动与沉积确实具有明显关联。

二、南海北部海域东段周缘陆域地质背景

粤东地区中生界发育较为普遍,主要为侏罗系和白垩系,属陆相沉积;下白垩统以陆相火山沉积建造为主,此外大面积发育中生代火成岩。从本区搬运而来的碎屑物质对南海北部珠江口盆地一带和台湾浅滩陆架、陆坡的沉积作用影响甚大。

南澳岛周边海岸地貌主要有低山和丘陵,含砂质海岸、沙滩、沙堤,以及标高为50 m的海蚀遗迹。该岛除了沿岸低洼处被少量第四系所覆盖以外,90%左右的面积分布着燕山期花岗岩类岩石,断崖峭壁随处可见。猎屿-虾公尾断层北端出露火山岩,南端出露花岗岩,岩石破碎并且强片理化,未见明显的断层面;东澳断层位于花岗岩中,倾角很陡,倾向难以确定,花岗岩除强烈破碎外,还有混合岩化、片理化,破碎带内可见到清晰的断层面,断层面发育擦痕,根据擦痕方向判断其为左旋断层。位于粤东地区的另一大岛东山岛周边海岸地貌以丘陵、台地为主,海岸曲折,多港湾,有较多的

地层出露；断层所表现的特征与南澳岛相似，其中的东山－南澳断裂由一系列北东向断层组成，至少有两次活动期，第一期为塑性韧性剪切挤压变形，第二期为脆性破裂。

粤东大鹏湾和大亚湾属山地基岩海岸，大鹏湾含海湾沙滩、沙堤、湾头和岬角的海积洪积平原等地貌特征；大亚湾含沙滩沙堤、拦湾沙堤及邻近的海积平原、泻湖平原、侵蚀剥蚀低山、丘陵、台地等地貌特征。红海湾和碣石湾的沿岸地形较为平坦，台地和平原遍布，湾内以沙坝泻湖为主体，岬角侵蚀地貌较为普遍。韩江三角洲以海积、冲积平原为主体，地形平坦，含海积平原，湾内沙滩、沙坝、岬角海蚀崖、丘陵、台地等地貌单元。

台湾岛自东向西可划分为海岸山脉带、台东纵谷、中央山脉、西部山麓带和沿海平原带五个构造沉积单元。发育的地层自老而新主要有：中生界下白垩统，岩性为钙质长石砂岩、砂质灰岩、泥岩、凝灰岩、长石砂岩、硅化凝灰质条带；古新统王功组，上部为海相砂、泥岩互层，下部为凝灰岩、集块岩和玄武岩；下－中始新统双吉组，西部和南部为陆相沉积，东部和东北部为海相沉积；上始新统一渐新统五指山组，岩性为砂岩和砂页岩，台湾西岸大部地区缺失上渐新统；下中新统－中中新统野柳群和瑞芳群是两个陆、海相沉积旋回，与下伏地层呈不整合接触，岩性多为砂泥岩互层；上中新统三峡群，沉积较薄，地层由陆自海的沉积旋回特征明显；上新统锦水组和卓兰组，由海相砂、页岩互层、夹凝灰岩、玄武岩及煤层组成（钟建强等，1994），沉积厚度巨大，沉积物多为玄武岩与砾岩或泥岩互层；第四系：下部早－中更新世头嵴山组，以砂、砾岩为主，厚 1000～1500 m，与下伏层呈整合接触；上部大南湾层出露于台地和海域（钟建强等，1994）。从台湾岛陆域搬运而来的陆缘碎屑物质对台西南和台湾浅滩陆架、陆坡的沉积体系产生了重要的影响。

第二节 南海北部海域地貌特征

南海北部海域地貌单元自北而南分为海岸带、陆架、陆坡和深海盆地，前者水深一般为数十、数百米至上千米，基底为陆壳岩石，后者水深一般大于 3000 m。

南海北部海岸类型以港湾式砂坝海岸为主，海域地貌的显著特征是地势从周边向中央倾斜，中央海盆水深达 4700 m。从边缘向中心，地貌类型依次可分为陆架、陆坡、深海平原及其间海山、海台。大大小小岛屿散布于盆地内部，大部分岛屿为陆壳碎块，其余部分由海底喷发的玄武岩组成。

南海北部陆架是世界上最宽阔的陆架之一，西起北部湾，东止台湾海峡，其间还连接台湾浅滩。陆架长 1425 km，最大宽度 310 km。台湾浅滩以 40 m 等深线为界，其外形为椭圆形，长轴为 NE 方向。台湾海峡的海底地形总体平缓，高差大多小于 60 m，现代水深具西浅东深不对称特征，东部等深线梯度比西部大 3～4 倍，且水深由北向南逐渐增加，北部新竹附近深达 82～91 m，虽受澎北穹窿构造影响，水深往南减至 40 m 左右，但经过该穹窿后，深度又不断增加，到台湾岛南端附近迅速增至 2600 m；随着水深梯度剧烈变化，宽度也逐渐加大，形成喇叭状的水下盆地。珠江入海口一带的陆架明显增宽，呈圆弧形向东南突出，发育水下三角洲和若干阶地。陆架外缘坡折线水深差异较大，但大部分位于 100～300 m 之间。西部北部湾陆架外缘水深为 200～250 m。

陆坡和岛坡地形崎岖不平，起伏较大，是南海地形变化最复杂区域。北部陆坡东起台湾东南端，西至西沙海槽，与深海平原的分界水深为 3400～3700 m。陆坡整体上呈 NE 向展布，全长约 1350 km，宽 143～342 km，西宽东窄，面积约 $21.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。西部陆坡比较陡峻而狭窄（图 1-2）。陆坡主要地貌类型有海台、陆隆、海山、海丘、海底峡谷、海底扇、海槽和海脊等，以堆积型陆坡斜坡为主，局部因受断裂控制，发育有断褶型陆坡斜坡和海台。台湾浅滩 30 m 左右水深起发育 NW 向的海底峡谷，下部至 3500 m 水深后汇入马尼拉海沟，全长约 315 km。

南海北部海域最南部为深海平原，以平原地貌为主，并有高差悬殊、宏伟壮观的链状海山和线状海山分布（图 1-3）。深海盆地北部边界与陆隆及陆坡相接，西部和南部界线为海台和海山，东部被海沟所切截。

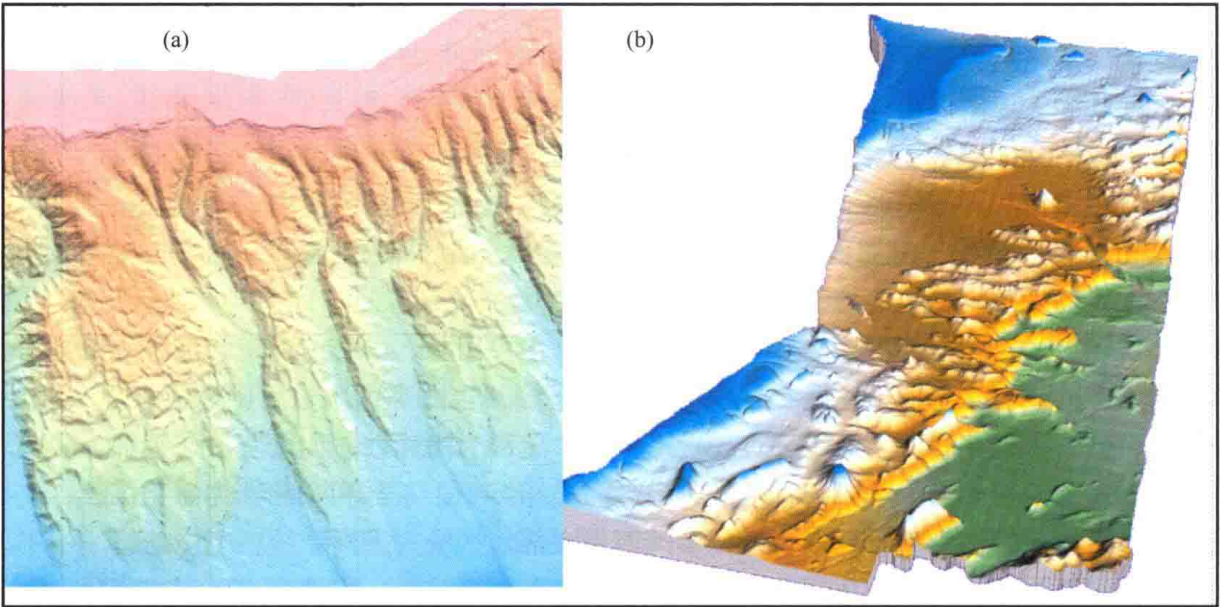


图 1-2 南海北部和西部陆坡地貌特征
Fig. 1-2 Morphologic characters of the northern and western slopes in the South China Sea
a—北部陆坡；b—西部陆坡

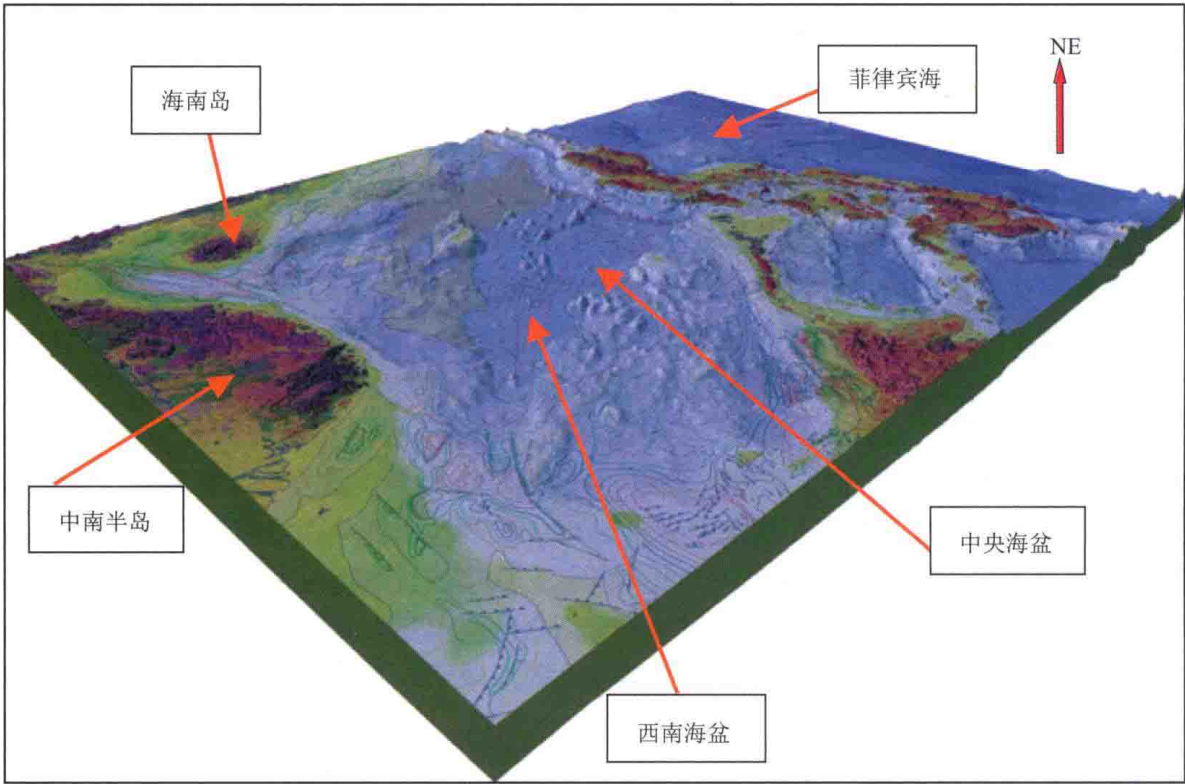


图 1-3 南海深海平原及周围地貌特征
Fig. 1-3 Morphologic characters of the deep-sea plain in in the South China Sea and its surrounding areas

第三节 南海北部海域现今水动力特征

南海北部发育活跃的海洋作用过程，其中的海流和内波（Fang et al.，1998；张兴阳等，2002）是海洋水动力的重要组成部分。现今南海环流体系具有复杂而独特的“三明治”型结构，包括表层流、中层流和深层流（Liu et al.，2010；Su，2004）。按其所活动的水体深度来判别，表层流下界约

300 ~ 350 m、中层流下界约 1000 ~ 1350 m 和深层流（其余深度）。这些海流作用于沉积体系之上，不可避免地对陆缘区（注：本书将陆架 - 陆坡等接受陆缘碎屑沉积的区域称之为陆缘区）位于各深度范围内的各种类型的沉积体系产生塑造和改造的作用。

影响陆架区的海流主要为表层环流体系，而陆坡区和深海平原则受中层环流和深层环流的影响较多。前人多年研究表明（Li et al. , 2013; Liu et al. , 2010; Su, 2004），南海表层流体系主要受亚洲季风的控制，并且明显受到黑潮向南海北部侵入的影响。南海及邻区冬季多盛行西南季风，导致南海的表层环流整体呈逆时针流动（图 1 - 4），夏季其流动方向正好相反，环流整体以顺时针流动为主（Fang et al. , 1998）。主要的表层流类型包括从内海岸到外陆架的沿岸流（longshore current）、广东沿岸流（Guang Dong Coastal Current）、南海暖流（South China Sea Warm Current）等。其中，内海岸到外陆架的沿岸流的流速大约为 10 cm/s，影响范围多限于近岸地区；广东沿岸流受季节变化的影响较大；表层流的特征与季节有关，冬季流速度较大、持续时间较长，最大流速可达 15 ~ 30 cm/s，相比之下夏季流的持续时间和流速均较小；南海暖流在广东沿岸流外侧流动，其最大特征是流动方向与季节无关，常年向东北方向流动。

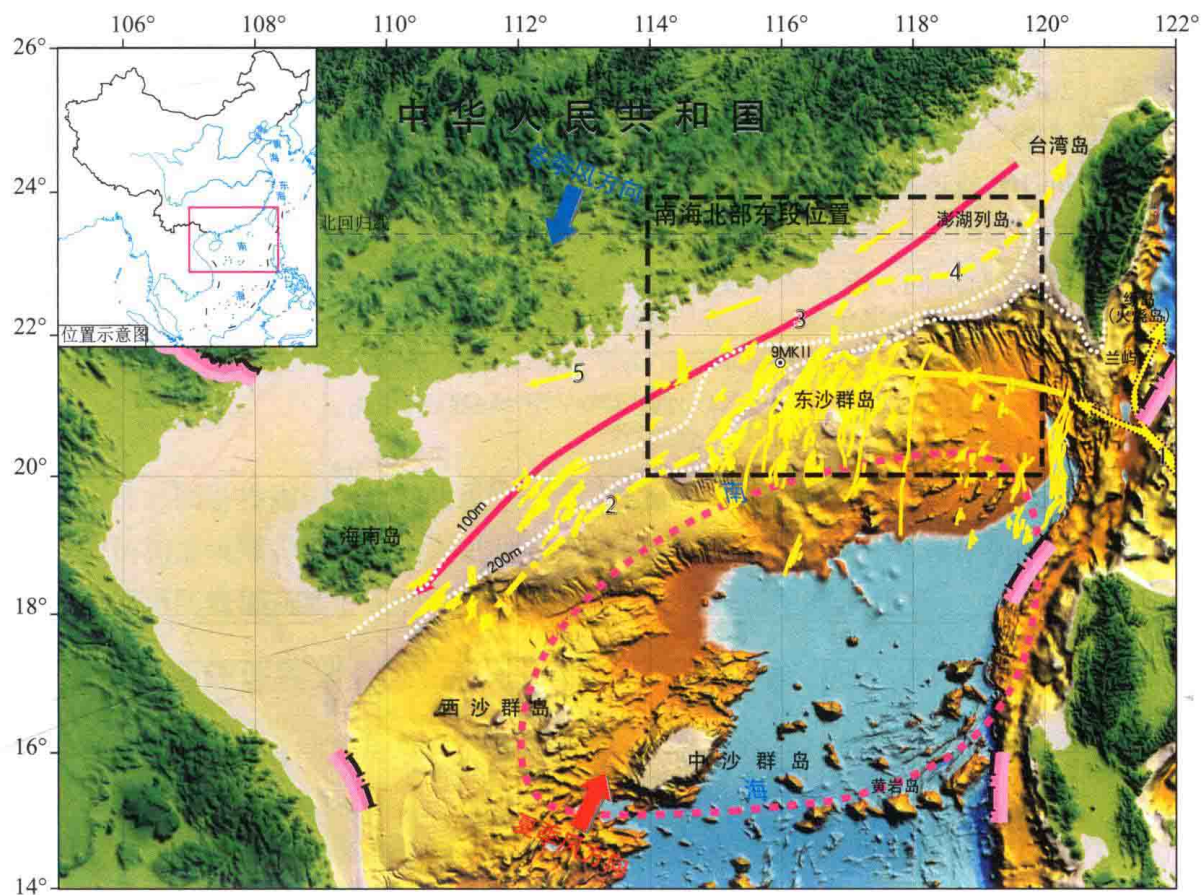


图 1 - 4 南海北部海域现今水动力路径

Fig. 1 - 4 Currnet hydrodynamic force route in the northern South China Sea

1—黑潮；2—黑潮南海分支；3—广东沿岸流；4—南海暖流；5—内海岸到外陆架沿岸流。

—— 黄色断线为内波波脊线，红色虚线为环流路径

此外，黑潮也被认为是表层环流的重要部分，但是其平均影响深度通常超过 800 m，因此对陆架、陆架边缘和上陆坡的沉积体系具有一定的影响（Li et al. , 2013）。研究表明，不论夏季还是冬季，均有黑潮分支进入南海北部陆坡，直至向陆架地区入侵，并且是造成东沙海域一带海底地层剧烈剥蚀的首要因素。

与潮差较大、潮汐砂脊非常发育的东海和黄海相比，南海的潮差相对较小，且主要受到从吕宋海峡传入的太平洋潮波系统的影响。因此，推测潮汐和潮流作用在南海不是主导的水动力条件。

第四节 南海北部海域陆坡地貌

受南海复杂的大地构造格局和演化史的影响，南海北部陆坡具有多姿多彩的地貌形态和空间变化。高精度测深资料、地震资料等揭示了陆坡地貌的空间变化特征。通过深入研究发现，南海北部陆坡走向和地形等深线的变化趋势具有一定的规律性。

一、陆坡地貌特征

南海北部海域陆架宽度巨大，最宽处超过 300 km，坡度平缓，仅为 0°03′~0°04′。在这种地形条件下，小幅度的海平面升降可造成岸线在陆架区长距离的侵进或后退，进而对三角洲、滨岸和浅海陆架沉积体系的展布产生控制作用。

相对而言，南海北部海域陆坡在 E - W 方向上延伸较长，而且自东而西由于陆坡基底的构造差异、与河口位置的远近关系及海水作用的强度不同，使坡折变化的突兀程度和地层叠置样式在不同部位均具有很大的变化，这种差别反过来势必会在横向上（E - W 向延伸）控制不同深水陆坡的沉积类型。

卓海腾等（2014）采取曲线拟合的方法（图 1 - 5），研究了南海北部陆坡的地貌形态，识别出下凹型、平直型、“S”型等 3 种类型的陆坡地貌形态（图 1 - 6）。不同类型的陆坡具有特定的地层叠置样式、陆架坡折迁移轨迹和沉积体系分布特征。

分析结果表明，下凹型陆坡发育在莺 - 琼陆坡西部、珠江 - 白云陆坡中部两个区域（陆坡分区见下文），但其成因有所不同，前者主要受控于快速的沉积物供给，后者则受到陆架边缘三角洲进积

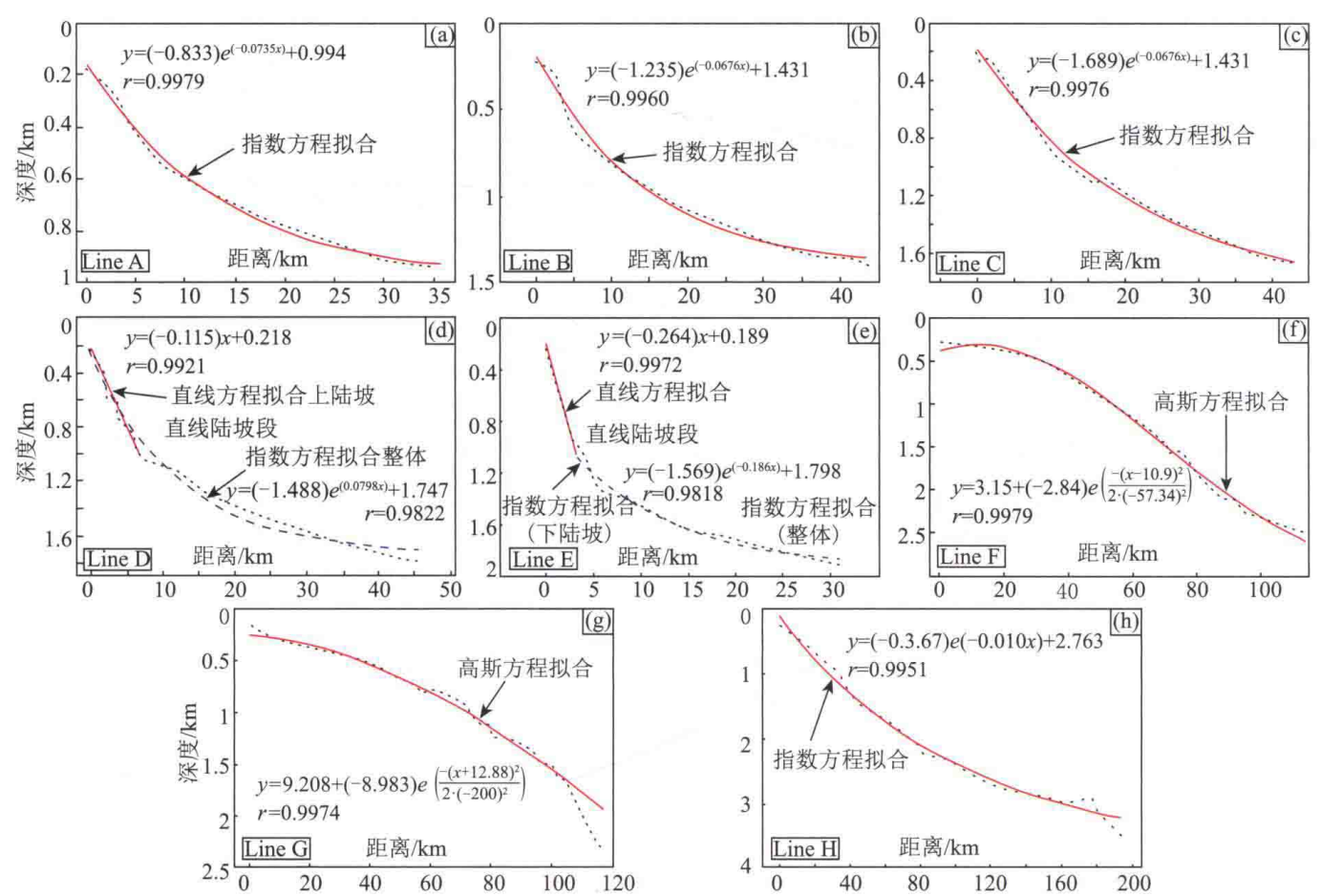


图 1 - 5 南海北部海域陆坡地貌形态曲线拟合结果

Fig. 1 - 5 Fitting graphs of morphology about the slope of the northern South China Sea
(据卓海腾等, 2014)

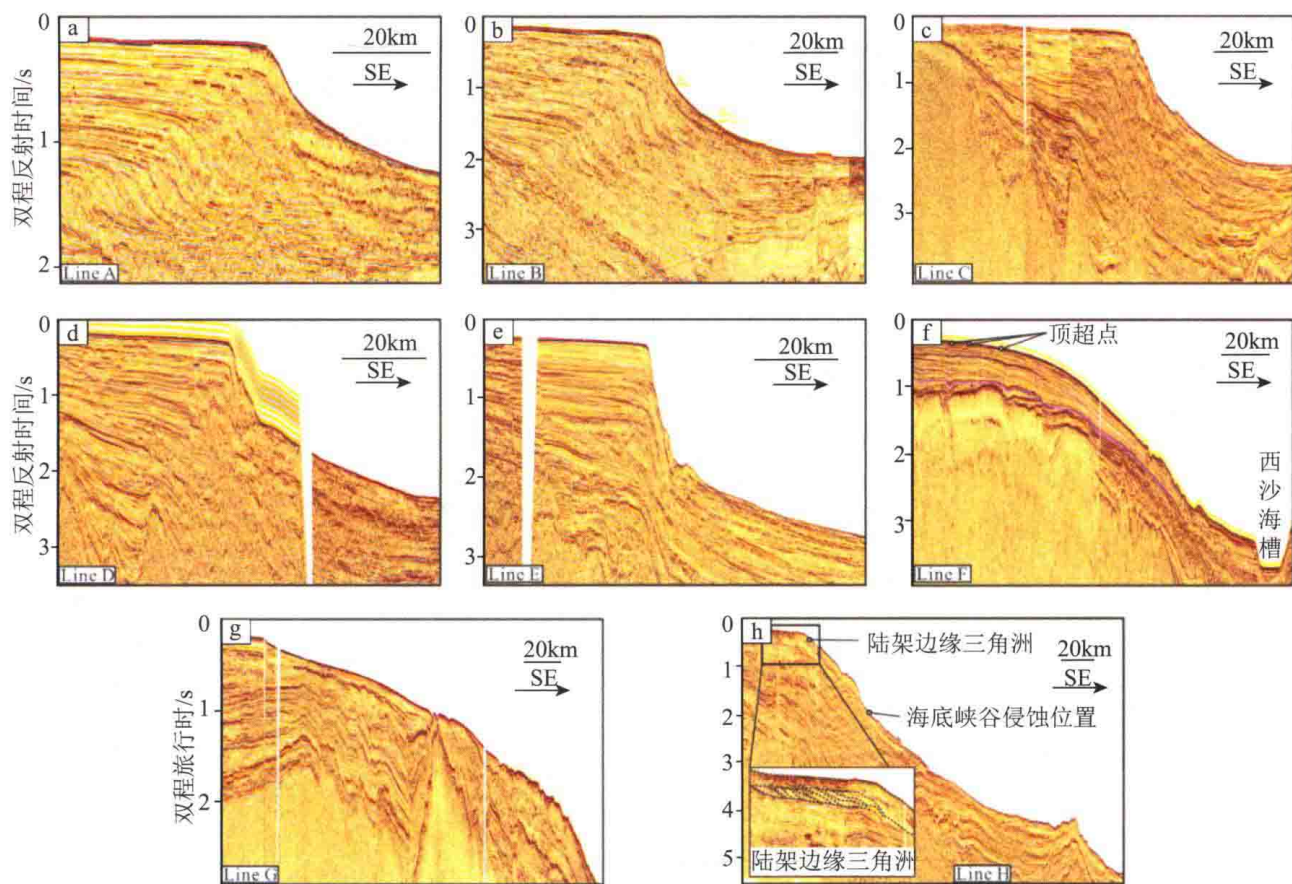


图 1-6 南海北部海域典型地震剖面，示陆坡地貌类型

Fig. 1-6 Typical seismic profiles showing slope morphology the northern South China Sea
a、b 为下凹型；c、d、e 为 平直型；f、g、h 为 “S” 型

和海底峡谷侵蚀的联合作用；平直型陆坡见于莺-琼陆坡东部和东沙陆坡，前者主控因素为弱的沉积物供给和较快的构造沉降，后者为稳定的地台所控制；“S”型陆坡发育在神狐陆坡区、珠江口盆地的两翼和台湾浅滩陆坡区，其形成明显受到海流和内波等外作用的改造。

二、南海北部陆坡段划分

南海北部陆坡可分为 5 个陆坡段，分别命名为莺-琼陆坡、神狐陆坡、珠江-白云陆坡、东沙陆坡和台湾浅滩陆坡（图 1-7）。

莺-琼陆坡（A）位于海南岛南部、北部湾的西南出口，西部毗邻越南陆架（图 1-7），南部则为西沙群岛的北部诸岛屿。受制于这种地貌，该陆坡西部为下凹型陆坡，东部为平直型陆坡。此外，以西沙海槽的槽床为界，可将该陆坡分为南翼和北翼两部，北翼具有窄而陡峭的特征（宽约 20 km），南翼则比较宽缓。

神狐陆坡（B）位于海南岛东南海域（图 1-7），南边则正对着中沙群岛的中沙海台，形态发育迥异于莺-琼陆坡，根据水深变化可分为两翼，东北翼水深较浅，坡度变化较大，西南翼水深较深，坡度较缓（图 1-7）。以“S”型陆坡为主。

珠江-白云陆坡（C）位于珠江口盆地以南（图 1-7）。与其他陆坡段相比，本类型的陆坡发育宽广，南部与深海盆毗邻。以“S”型和下凹型陆坡为主。

东沙陆坡（D）位于东沙群岛一带（图 1-7），陆坡区平缓，东沙群岛为其主体，以海台分布为主。地史时期多为被剥蚀或无沉积状态，沉积层极薄。以平直型陆坡为主。

台湾浅滩陆坡（E）位于南海北部陆坡的最东部、台湾岛的西南海域（图 1-7），其东界介于吕

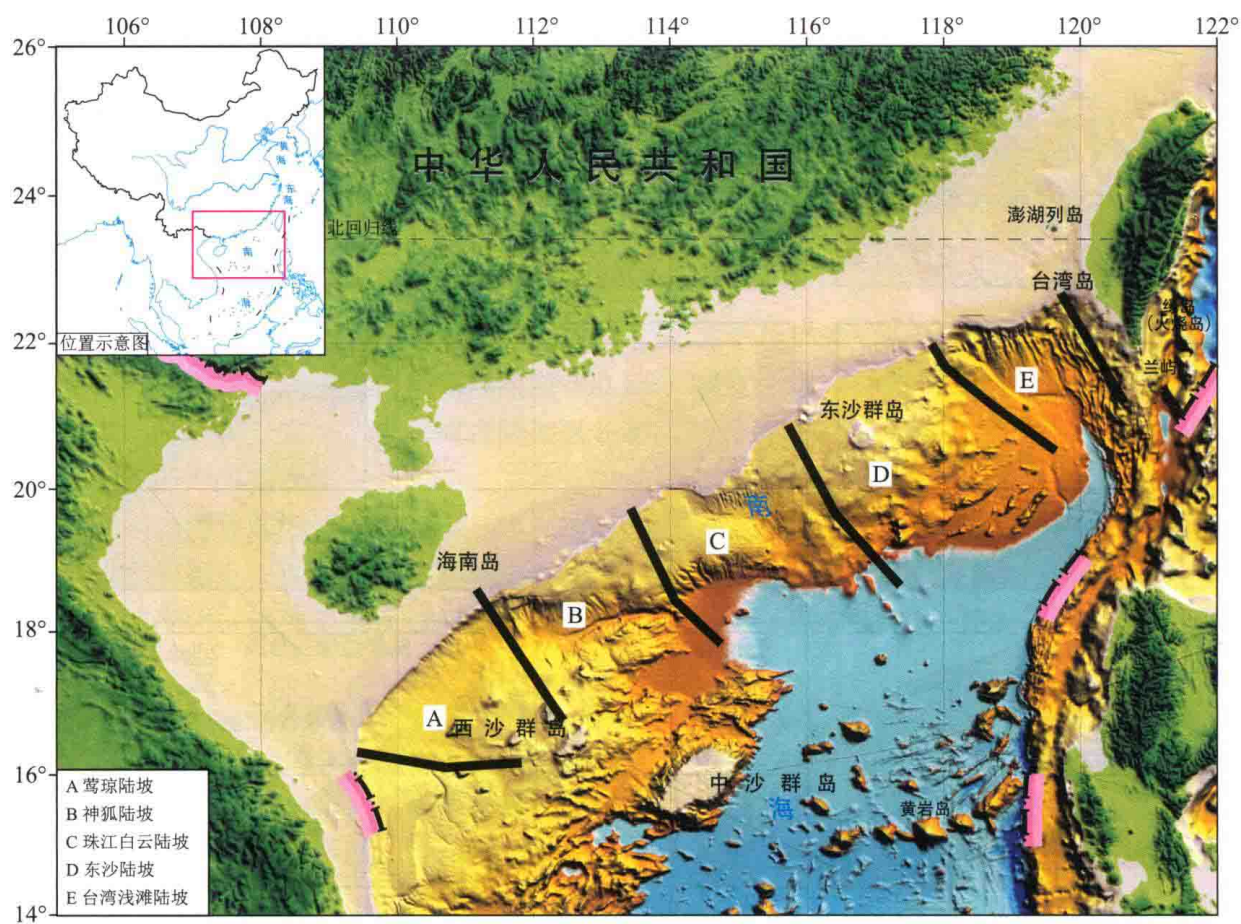


图 1-7 南海北部海域陆坡分段示意图

Fig. 1-7 Division of slope in the northern South China Sea

图中的黑色粗实线为陆坡分段界线

宋岛弧和台湾之间。东南与马尼拉海沟毗邻，陆坡南部发育以 NW - SE 向为主的海底峡谷，峡谷坡度约为 3.4°。陆坡向东南延伸与马尼拉海沟的北端融为一体，呈向南开口的喇叭口状，展布范围逐渐拓宽、加深。以“S”型陆坡为主。

第二章 南海北部海域西段表层沉积与源-渠-汇过程响应

“源-渠-汇”过程研究，对于认识陆域沉积物的剥蚀与搬运、短暂沉积在陆架的陆缘碎屑的再启动、分散和再搬运、再分选，以及最终沉积的各种水动力机制、动力现象和沉积响应尤为重要，也是解析深水沉积体内部构型、预测深水油气储层的重要手段之一。

南海北部海域西段系指自北部湾海域始、往东经由琼东南盆地、再往东至珠江口盆地西缘的陆架、陆坡、深海平原等区域（图2-1）。本章通过分析南海北部海域西段表层沉积物的矿物和化学组成特征，示踪其物质来源及各端元组分的贡献，分析碎屑物质由河口向陆架、陆坡、深海平原搬运的作用过程，进而分析碎屑物质在海洋中的扩散特征，探讨沉积物源区的地质背景和风化剥蚀状况，最终探索性讨论南海北部海域西段表层沉积物源-渠-汇过程。

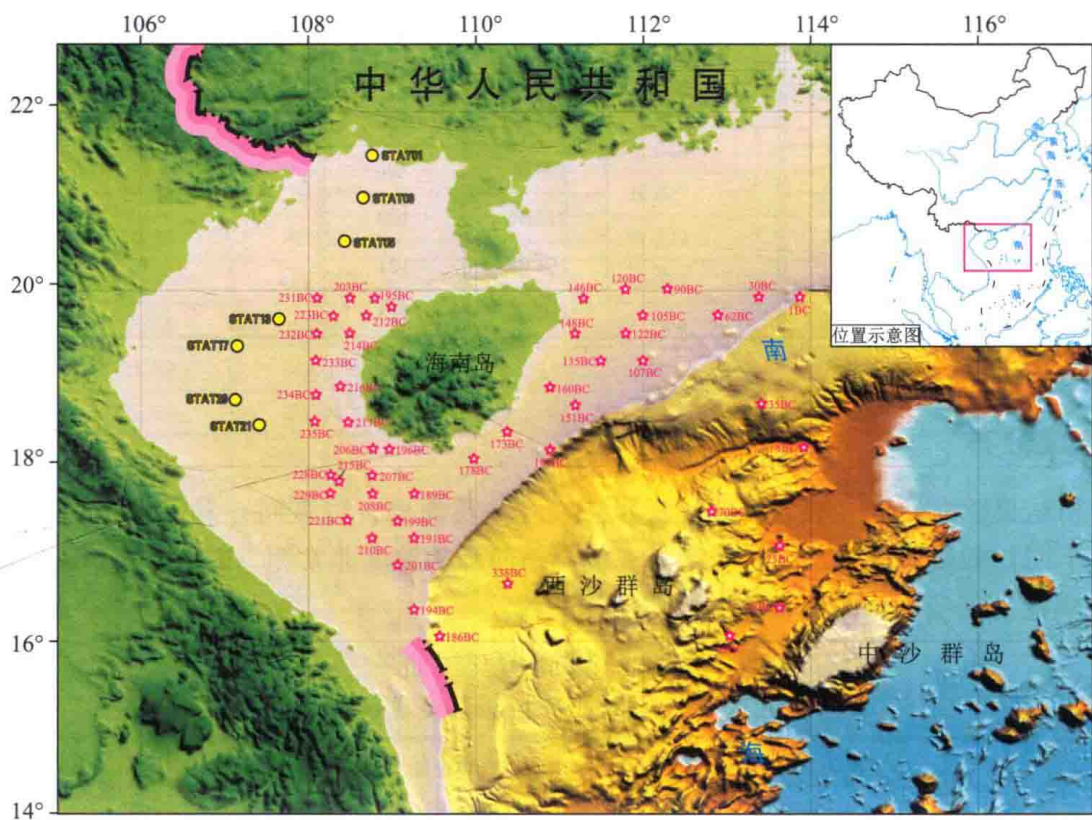


图 2-1 南海北部海域西段地貌以及表层沉积物采样站位分布示意图

Fig. 2-1 Morphology in the western part of the northern South China Sea and locations of corings

第一节 粒度与矿物特征

用于粒度和矿物分析的 56 个样品测站分别为：北部湾（12 个）、海南岛以东（5 个）、海南岛以西（9 个）、海南岛以南（11 个）、西沙海槽（4 个）、西沙海槽以南的深海盆（4 个）及海南岛以东（11 个）（表 2-1 和图 2-1）。