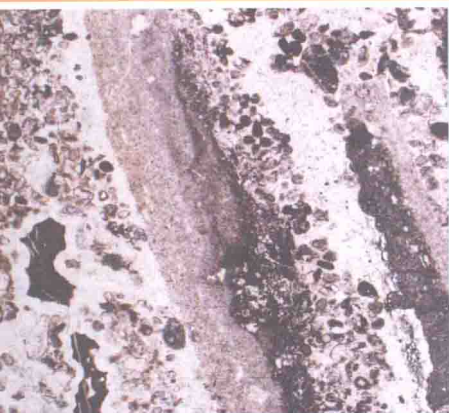
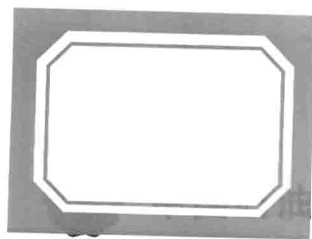


碳酸盐台地与 全球沉积演化



吴因业 张天舒 吴洛菲 郭彬程
赵 霞 周永胜 金春爽 岳 婷
侯宇安 陈瑞银 杜业波 等编译

石油工业出版社



勘探开发研究院出版物

碳酸盐台地与全球沉积演化

吴因业 张天舒 吴洛菲 郭彬程 赵霞 周永胜
金春爽 岳婷 侯宇安 陈瑞银 杜业波 等编译



石油工业出版社

内 容 提 要

本书在分析全球碳酸盐岩沉积特征的基础上,着重阐述了赤道碳酸盐和大陆架环境的碳酸盐沉积相模式,厚层浅水碳酸盐相分布的成因,白垩纪生物与碳酸盐台地,孤立碳酸盐台地的沉积层序演化,碳酸盐台地的淹没与全球缺氧事件,浅水碳酸盐台地的环境变化速率和同步性,地层不整合的沉积演化特征,以及台地沉积物的稳定碳同位素组分与全球旋回重建等科学问题。

本书可作为沉积学与层序地层学、石油地质学研究者、地质与地球物理勘探工作者、油藏工程师以及相关高等院校师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

碳酸盐台地与全球沉积演化/吴因业等编译.

北京:石油工业出版社,2013.9

ISBN 978-7-5021-9759-9

I. 碳…

II. 吴…

III. 碳酸盐岩油气藏-研究

IV. TE344

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第215089号

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with Petroleum Industry Press and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons Limited.

Copyright © 2012 International Association of Sedimentologists

本书经 John Wiley & Sons Limited 授权翻译出版,简体中文版权归石油工业出版社有限公司所有,侵权必究。

著作权合同登记号 图字:01-2013-6696

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010)64523543 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2013年9月第1版 2013年9月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:25.75

字数:660千字

定价:140.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

译者的话

碳酸盐岩沉积在油气勘探领域是十分重要的烃源岩和储层,同时也是重要的非常规储层类型之一。本书除了可应用于常规石油地质勘探领域之外,对非常规资源勘探也可以提供参考,在国民经济的能源建设中将发挥重要作用。本书的学术价值在于:(1)多方法开展碳酸盐岩的沉积环境分析;(2)稳定碳同位素组分与全球旋回重建;(3)碳酸盐岩的不整合特征与沉积层序演化研究。

本书对“十二五”及未来国家科技攻关项目研究、石油石化集团等系统的碳酸盐岩海相重大专项研究、岩性地层油气藏重大专项研究和非常规油气资源勘探研究有重要参考价值。

本书提出了许多全新的学术论点,例如赤道碳酸盐体系特征的认识,建立全球预测模型以掌握环境变化的过去与未来。碳酸盐岩—碎屑岩混积环境的晚始新世珊瑚建造体系中,生物丘随着三角洲复合体的前积,最底部富集骨骼的岩层由具粒泥灰岩到泥粒灰岩基质的苔藓虫浮石构成,它们含有大量浮游有孔虫,缺失与光作用相关的有机生物体。岩石结构、骨骼组分、建造解剖以及相结构的综合分析,揭示了这些珊瑚建造发育在前三角洲环境,在那里三角洲朵体的迁移或者降雨周期变化偶尔会形成适合藻珊瑚生长的水体透明度。其沉积建造的水深位置受依赖光的群落和岩相分布的控制。

在碳酸盐岩层序地层学研究领域,本书也提出了新认识。海相裂谷盆地的半地堑中发育起来的孤立碳酸盐台地,识别出了六个具有不同几何形态、地层结构、层序界面、岩相组成和叠置形式的层序。它们具有复杂的、多重作用的成因,是大地构造作用(区域沉降和断块旋转)叠加到全球海平面升降信号上的结果。另外,伴随沉积中心迁移而改变的碳酸盐生产主体和相对堆积潜力也影响了由大地构造和全球海平面变化混合作用产生的可容空间的充填和内部结构。本研究还证明,在裂谷盆地碳酸盐台地层序发育和台地淹没的过程中,全球海平面的升降和碳酸盐工厂的变化可能与大地构造的活动同等重要。该结果意味着,在其他类似的碳酸盐台地当中,由于人们习惯倾向于用构造解释,因此,全球海平面升降和碳酸盐工厂的作用或许并没有得到正确的认识。

本书的翻译工作主要由中国石油勘探开发研究院、国土资源部油气中心、北京大学、中国矿业大学(北京)等单位教授级高级工程师、高级工程师、博士(生)等总计 11 名科技工作者完成。中国石油勘探开发研究院研究生部部分博士生和硕士研究生刘群、邓晓娟、陈娅娜、杨沛广、边海关、兰锋、许翠霞和马良涛参加了部分翻译。

主译者名单和翻译任务分工见下表:

《碳酸盐台地与全球沉积演化》译者和翻译分工情况

译者姓名	简介	主要分工
吴因业	教授级高级工程师、沉积储层与石油地质专家,工学博士,国际沉积学家协会(IAS) 会员,岩相古地理专业委员会委员,北京地质学会理事。科研成果分别获省部级科技进步奖一等奖、二等奖等多项,出版有《油气层序地层学》等多部专著和译著《层序地层学原理》,发表学术论文 80 余篇	翻译第 1 章、第 13 章,编写附录 1、附录 2,校对初稿 2 篇。最终审稿与统稿
郭彬程	博士、高级工程师,从事沉积储层与石油地质勘探研究,发表学术论文近 20 篇	翻译第 8 章,校对初稿 1 篇
金春爽	博士、教授级高级工程师,从事沉积储层与油气资源战略研究,发表学术论文 20 余篇	翻译第 7 章,校对初稿 1 篇
陈瑞银	博士、高级工程师,从事有机地球化学与石油地质研究,发表学术论文 20 多篇	翻译第 10 章,校对初稿 1 篇
张天舒	博士(生)、工程师,从事沉积储层与石油地质研究,发表学术论文多篇	翻译第 2 章、第 12 章,校对初稿 2 篇
杜业波	博士、高级工程师,从事沉积储层与海外石油地质勘探研究,发表学术论文 10 多篇	翻译第 9 章,校对初稿 1 篇
侯宇安	理学博士,从事沉积储层与石油地质研究,发表学术论文多篇	翻译第 4 章,校对初稿 1 篇
吴洛菲	硕士研究生,从事储层建模与石油工程地质研究,发表学术论文多篇	翻译第 3 章,校对初稿 2 篇
岳婷	硕士研究生,从事沉积地质研究,发表学术论文多篇	翻译第 6 章,校对初稿 1 篇
赵霞	博士、高级工程师,从事石油地质研究,发表学术论文多篇	翻译第 11 章,校对初稿 1 篇
周永胜	德国留学博士、高级工程师,从事海外石油地质勘探研究,发表学术论文 10 多篇	翻译第 5 章,校对初稿 1 篇

翻译工作分三步完成,第一步完成第一稿后自己校译,第二步是相互校译,并请沉积学和层序地层学专家审阅,第三步是统稿,重点对各章节内容和翻译术语的一致性做了大量工作。本译著的完成,得到了中国工程院胡见义院士、中国石油天然气集团公司、中国石油勘探开发研究院有关领导和专家的大力支持,在此一并致谢!

由于本书内容丰富,涉及面广,特别是生物化石方面名词繁杂,加上时间紧迫,不当之处,敬请读者批评指正。

目 录

第1章	赤道碳酸盐:地球系统方法	(1)
第2章	大陆架环境的碳酸盐沉积相模式	(34)
第3章	厚层浅水碳酸盐岩相分布的成因	(61)
第4章	白垩纪生物厚壳蛤类与碳酸盐台地	(86)
第5章	孤立碳酸盐台地的沉积层序演化	(122)
第6章	碳酸盐台地的淹没与全球缺氧事件	(158)
第7章	浅水碳酸盐台地的环境变化速率和等时性	(190)
第8章	地层不整合的沉积演化特征	(219)
第9章	侏罗纪斜坡沉积不连续界面的表征	(256)
第10章	海相碳酸盐岩晚古生代冰期的地层特征	(298)
第11章	台地沉积物的稳定碳同位素组分与全球碳循环重建	(329)
第12章	碳酸盐岩—碎屑岩混积环境的晚始新世珊瑚建造	(347)
第13章	非海相盆地的大型沉积结构:可容空间与沉积物供给之间相互作用的响应	(377)
附录1	中国海相碳酸盐岩的图版:北京及周边长城系蓟县系和寒武系露头	(399)
附录2	中国陆相碳酸盐岩的图版:四川盆地侏罗系露头	(402)

第1章 赤道碳酸盐:地球系统方法

MOYRA E. J. WILSON 著

吴因业 译,吴洛菲 校

摘要 本文的假定条件是地球系统方法“从过程到产品”可以用于更好地建立识别和评价未知的赤道碳酸盐体系的预测模型。暖温连同常见碎屑、清水、营养物质的注入,以及赤道热带的盆地背景,都对碳酸盐沉积和成岩作用有重大影响。产生于赤道地区综合沉积作用的碳酸盐体系特征包括:常见光能自养生物和异养生物的出现,文石或钙质为主的矿物,缺少包粒或团粒,常常与碎屑岩伴生,不与蒸发岩伴生,台地类型分散,包括欠透光型碳酸盐台地。此外成岩作用特征包括:常见泥晶化(micritization)和生物侵蚀,缺少海相胶结物,广泛的渗流溶蚀作用和伴生的潜水胶结作用。大气地下水流域也存在大量的钙质对文石的交代作用,常见埋藏压实作用和渗流作用,以及经由海水或大陆来源的地下水流引起局部的块状白云石化作用。虽然赤道碳酸盐位于暖水的光能生物相组合带(Photozoan Association),许多上面描述的特征却与暖水干旱对应的沉积模式不一致。相反,部分赤道碳酸盐沉积特征显示与冷水形成的相似,因此区分这两种不同气候带的碳酸盐十分困难。建议识别显生宙赤道碳酸盐发育的主要依据有:(1)多种多样的方解石或文石光能自养生物;(2)常常有异能生物相组合因素(Heterozoan Association);(3)独立的(例如同位素的)证据表明暖温(大于22°C)。指向潮湿的赤道背景的其他证据是:(1)合适的古纬度条件;(2)缺少蒸发岩沉积组合,缺少包粒(coated grain)或团粒(aggregate);(3)海水盐度减少或养分上涌的地球化学证据。本文目标是更清楚认识和了解赤道碳酸盐体系,建立全球预测模型以掌握环境变化的过去与未来。

关键词 碳酸盐礁 新生代 碎屑岩 成岩作用 潮湿的赤道气候 养分 东南亚 构造

1.1 概况

温水环境中(热带)和在冷水环境中(温带)中形成的碳酸盐是有很大差别的,这一点大家都了解(Lees 和 Buller, 1972; Nelson, 1988; Jones 和 Desrochers, 1992; James, 1997; James 和 Lukasik, 2010)。但是,对于在温水环境中碳酸盐沉积体系的多样性,尤其对湿润的赤道体系中的碳酸盐大家就了解得很少了(图 1-1; Lees 和 Buller, 1972; Lees, 1975; Wilson, 2002, 2008a)。赤道周围的气候特征为常见碎屑、清水、营养物质的注入,而这些经常是我们容易忽略的,并且可能刚开始我们会认为与碳酸盐群落和系统的多样性是不相协调的(图 1-1 和图 1-2; Fulthorpe 和 Schlanger, 1989; Tomascik 等, 1997; Wilson, 2002, 2008a, 2011; Park 等, 2010)。

提到热带的碳酸盐以及由于“蓝色的海水”所形成的极其多样化的群落,我们脑海中马上会出现贫瘠的营养物质以及热带的礁的成群出现(绿藻动物和光能自养的群落; Lees 和 Buller, 1972; James, 1997)。在温暖的、受波浪和洋流搅动的浅海中,我们也可以见到鲕粒的沉积和跳跃(Lees 和 Buller, 1972; Jones 和 Desrochers, 1992)。相比较而言,在冷水的系统中,有洋流刻蚀的小的群落和软体的壳类动物更为突出(Lees 和 Buller, 1972; Lees, 1975),而在营

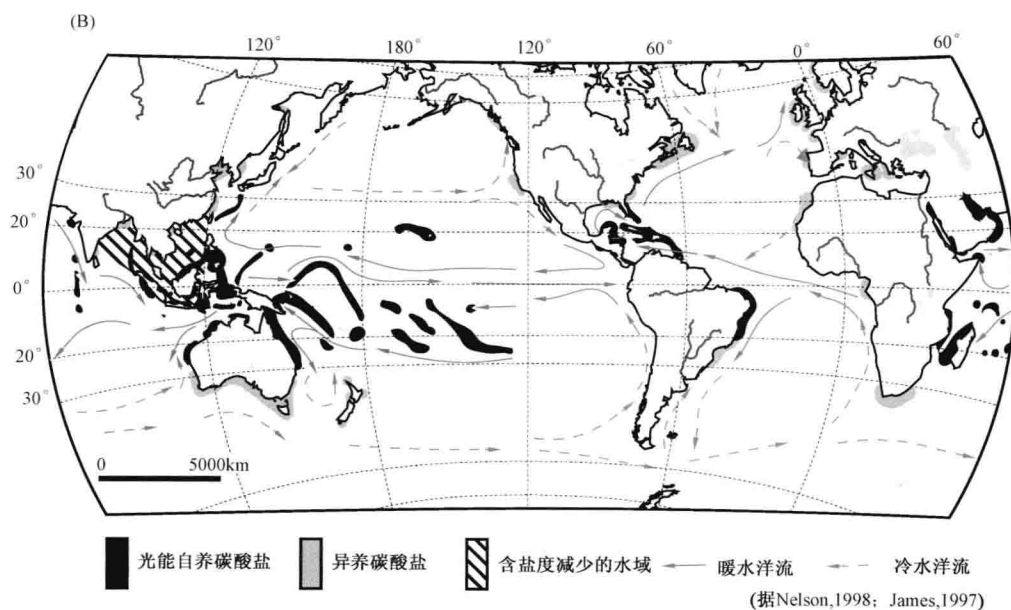
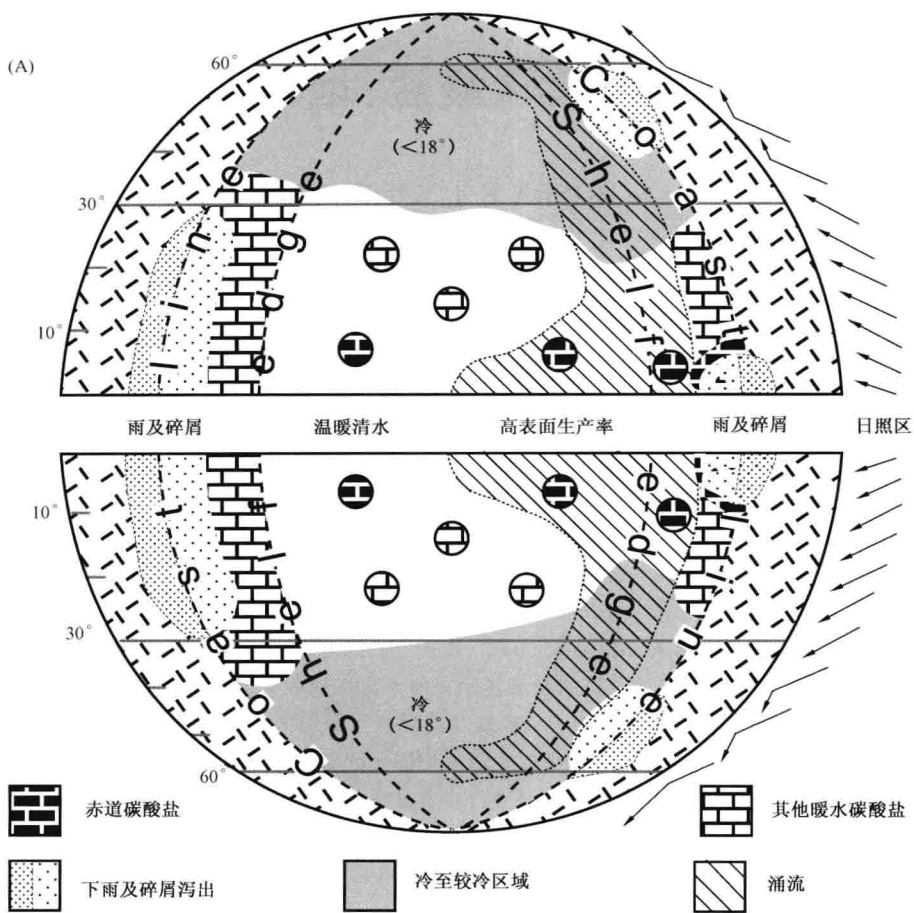


图 1-1 现代碳酸盐全球分布的影响因素

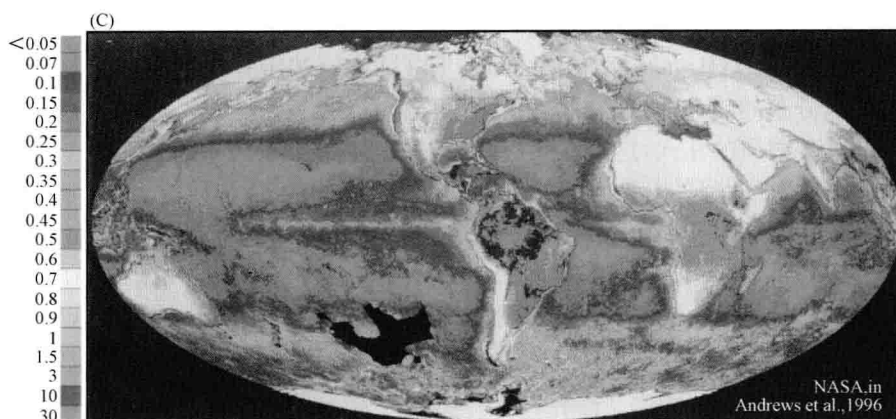


图 1-1 现代碳酸盐全球分布的影响因素(续)

(A) 浅海碳酸盐沉积的一些重要因素的理想化模型(修改后,Ziegler 等,1984;Nelson,1988)。陆架和岛屿上发现的暖水碳酸盐都显示为砖式的排列,赤道碳酸盐(表现为反置的积木式)已经被添加到原始图表,并且它们通常受到地面径流、上升流和温暖温度的影响。异能生物相组合(Heterozoan)碳酸盐(图中没有显示)通常发育在凉爽到寒冷的温度范围内,或在光能生物相组合(Photozoan)系统下(温水)。(B) 现代碳酸盐聚集的全球分布(修改后,Nelson,1988;James,1997)。在赤道热带,值得注意的是东南亚重要的光能生物相组合碳酸盐(温水)的发育:一个海洋盐度降低,具有明显的地面径流和上升流的地区。(C) 美国宇航局提供的全球生物圈的卫星图像(Andrews 等,1996),这主要是对以叶绿素为主的光谱的分析(色素浓度的单位是 mg/m^3)。叶绿素含量提供一种对植物量的估计,并代表了植物的生产率,这在海洋中反映了上升流和养分径流

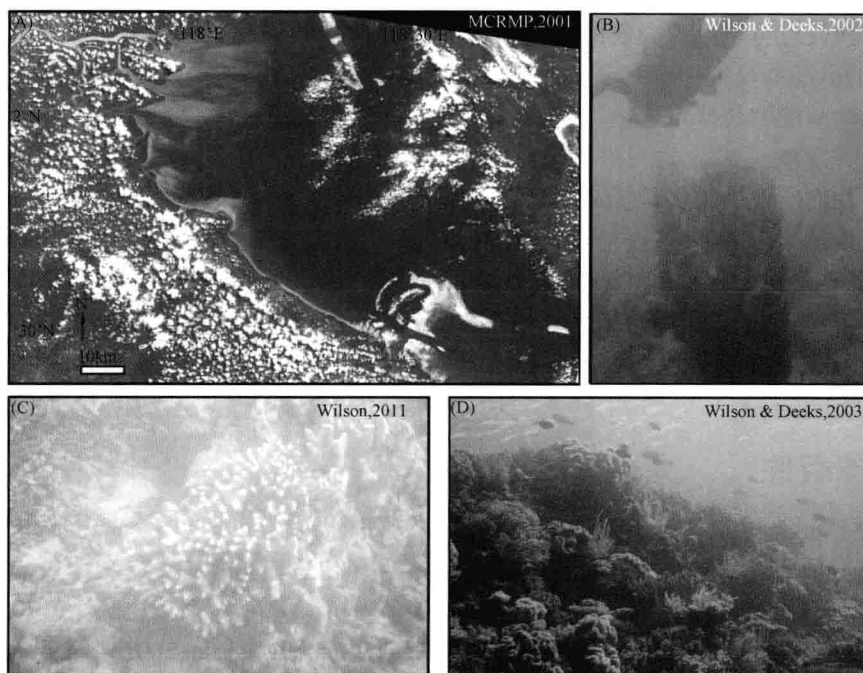


图 1-2 东南亚现代碳酸盐系统

(A) 现代碳酸盐形成于 Mangkalihat 半岛北部和 Borneo 北东 Berau 三角洲的东部混合碳酸盐碎屑岩陆架上(利用 Landsat-7 卫星所拍摄的遥感影像采用 RGB 321 真彩色合成,轨道参数为 116,59。来源于美国宇航局基金赞助的南佛罗里达大学和机构研究的千年珊瑚礁测绘项目,影像获取时间为 2001 年 2 月 27 日)。(B) 作者在苏拉威西 Tukang Besi 群岛小于 10m 水深的地方观察到一个巨大的桶海绵,横向视野是 2m。(C) 现代珊瑚礁沉积于 Borneo 东海岸浑浊沉积影响区域,水深 1~2m 的地方(Wilson,2011),横向视野是 50cm。(D) 位于 Tukang Besi 群岛的现代珊瑚礁边缘主要由软珊瑚构成,横向视野是 5m

养物质供应充足的地方,大量的海百合和苔藓虫的草地也会出现(异能生物相组合;Lees 和 Buller,1972;James,1997;Hayton 等,1995;James 和 Lukasik,2010)。浅的近热带的条件下往往会有全球生物礁分布的热点地区(在印度西太平洋存在的“三角礁”),这些地方往往会有一般到极为丰富的营养物质的注入,这很显然与我们上面所说的理论是相互矛盾的。事实上,在很多近赤道的礁体中,很明显的有两种非常不同的光能生物相组合和异能生物相组合系统的出现(Tomascik 等,1997;Wilson,2002,2008a;Wilson 和 Vecsei,2005)。异养型生物比光合自养型生物在体重方面要重(比如说在很多东南亚的石珊瑚的礁体)。另外由于物质的上涌和陆源物质的注入,低的见光度和比水表面更冷的温度是很普遍的,并且它不适用于我们经常所说的“蓝水系统”(Potts,1983;Tomascik 等,1997;Wilson 和 Vecsei,2005;Wilson,2008a,2011)。这些差异就不得不引起大家思考一个问题,对于近赤道的热带的碳酸盐体系以及它们的沉积物来说,有什么是不一样的呢?

在这篇文章中我们用评价环境以及盆地演化过程的地球系统方法来更好地了解赤道碳酸盐体系的沉积和地质产物。这种可以等同为“源到汇”的方法一出现就在碎屑岩沉积中得到了广泛的应用。在碎屑岩体系中,侵蚀(源头)和沉积(沉降)的地形是通过沉积物的沉积路径系统联系起来的,并且受到环境的控制(Allen,2008)。然而在碳酸盐岩系统中,源和汇一般是一体的。有一个共同的认识,那就是“碳酸盐是自己生成的,而不是靠运移的”,并且碳酸盐来自于自身的营养供给系统(James 和 Kendall,1992)。碳酸盐受到一系列的复杂环境的影响,生物和化学的影响一般高于物理的。另外,因为沉积后的变化,碳酸盐的沉积物通常更加致密,而这些变化往往也可以反映表面的环境条件和深部盆地的演化进展过程。简而言之,在“过程到产物”的碳酸盐研究中很有必要把碳酸盐的海水环境与相连的地形演化、海洋学、大气、生物圈和地球圈的变化联系起来。

这项研究反映了碳酸盐沉积和相应的变化在多大程度上反映着赤道周边当地的环境情况。在这里我们所说的很多例子都是来自于作者在东南亚的新生代地层的研究,这里的生物和地质特征是最为丰富的。这样一个方法同样也具有全球的适用性,在全球很多地方的碳酸盐体系中,都有很强的相似性(Testa 和 Bosence,1998;Gischler 和 Lomando,1999)。在有可能的地方,也会对其他赤道周边地区作比较,包括其他的气候带以及更早的时期。对于本篇文章内容的理解还可参见另外一本同时出版的著作,其中详细地阐明了东南亚的碳酸盐体系(Wilson,2011)。

1.2 环境条件

按照地球分带,赤道位于 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 之间的热带间聚合带(Inter Tropical Convergence Zone, Lockwood,1974)。尽管在气候学术语上并不一致,许多位于赤道附近 5° 范围内的低洼地区都具有高热(大于 18°C ,通常大于 20°C 且温度的变化小于 2°C),相对湿度高(通常 $70\% \sim 90\%$)和全年陆上大降雨量(大于 1500mm/a ;图1-3;Lockwood,1974;Sale,2002)的特点。降雨量的极小值存在于海上,而在赤道大陆地区和东南亚,大降雨量通常伴随着雷雨(图1-3;Lockwood,1974)。多季节性赤道气候的地区是由于低气压带的移动,信风的多变性或者季风的转变引起的,这些地区大多位于赤道附近 $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 之间(Lockwood,1974;Sale,2002)。这些季节性地区在温度和降雨量上都随年波动,通常在炎热的夏季月份(大于 20°C)具有一个明显的潮湿季节($500 \sim >1500\text{mm/a}$)(图1-3;Lockwood,1974;Sale,2002)。赤道带内,这种“定期潮湿”和“季节性”的气候以及伴随的风模式强烈影响着沿海地区地表温度、径流、碎屑、养分和

淡水的流入(图 1-4)。东南亚半封闭的海面上,海洋环境中的这种气候条件并不像开放海域一样被全球性海洋特征所“稀释”。事实上,在这种半封闭的环境中,这些因素可能被“放大”,比如水流(图 1-5;Tomascik 等,1997;Park 等,2010)。赤道地区的温度促进了温水碳酸盐的发育。然而,其他的气候相关的因素影响着赤道地区海洋的盐度、浊度、养分和化学饱和度,这种化学饱和度同时控制着赤道碳酸盐的特征(Tomascik 等,1997;Wilson,2002,2011)。

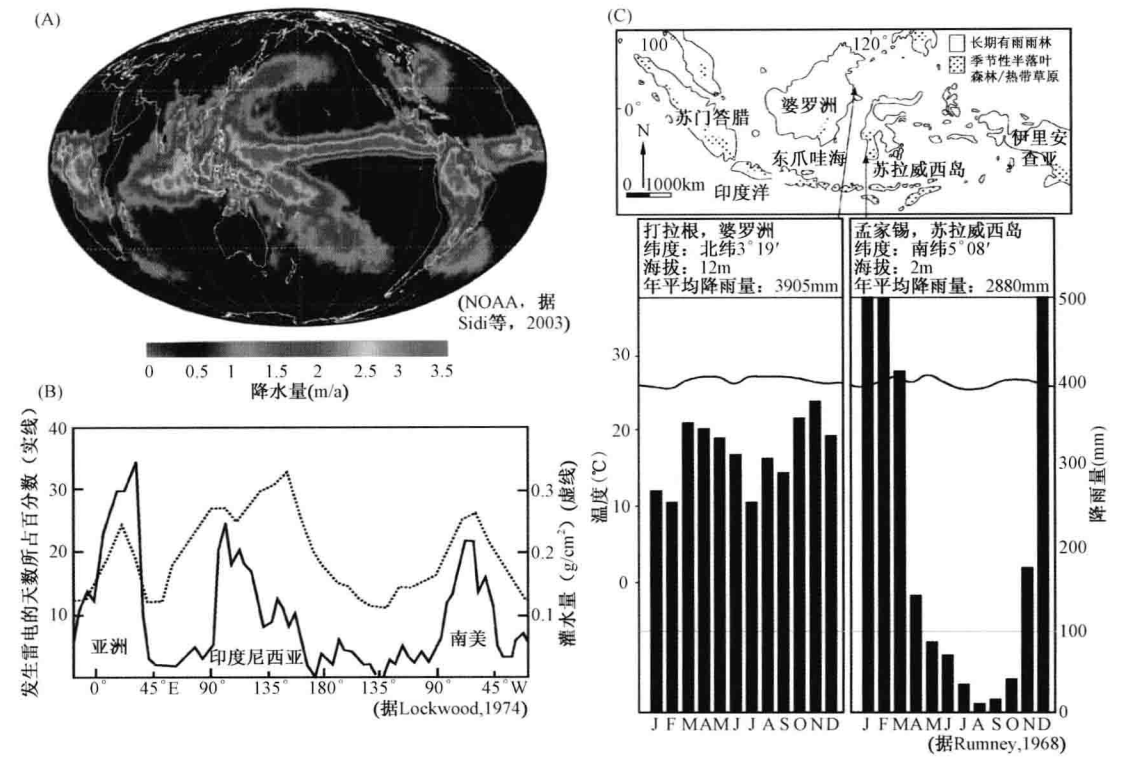


图 1-3 东南亚和赤道热带的气候环境

(A) 全球各地的年平均降水量,根据特殊传感器微波成像获取的资料(SSM/I)。1987 年开始收集卫星资料。NOAA 资料,来自 Sidi 等(2003)。(B) 在北纬 10°和南纬 10°之间的赤道地区。年雷雨天所占百分比,以 5°经度间隔(实线)。500mbar 气压上水蒸气的量,以 g/cm^2 为单位,10°经度间隔(据 Lockwood,1974)。(C) 地图显示东南亚长期有雨雨林和更多季节性森林的分布(据 Rumney,1968;Morley,1999),以及气象站的位置。赤道附近长期有雨雨林(Tarakan)和季节性森林(Makassar)地区的温度和降雨量数据全部来自 Rumney(1968)

东南亚一直是一个具有大量大陆架海洋环境的地区,由大大小小的岛屿组成,海底高地在整个新生界时期被弯曲的海道分隔(Tomascik 等,1997)。这种潜在碳酸盐发育地区的范围和多样性在其他赤道地区是不能相比的,这使东南亚成为研究沉积过程和沉积多样性的理想天然实验室(Fulthorpe 和 Schlanger,1989;Wilson,2002,2008)。相比之下,中美洲、非洲和印度(在新生代时期向北漂移)是典型的大陆架和很小范围的近海浅滩或岛屿(James 和 Glinsburg,1979;Testa 和 Bosence,1998;Gischler 和 Lomando,1999)。尽管太平洋或许与赤道碳酸盐系统的传统观点紧密相关,但其主要还是发育与火山岛和海底山有关的深海碳酸盐(Potts,1983;Camoin 和 Davies,1998;Montaggioni,2005)。东南亚的地区多样性由非常复杂、活跃的构造作用控制,大量的微型大陆断块、盆地和火山岛弧并列发育在欧亚和澳大利亚板块之间的碰撞带(图 1-5;Hall,1996,2002;Wilson 和 Hall,2010)。

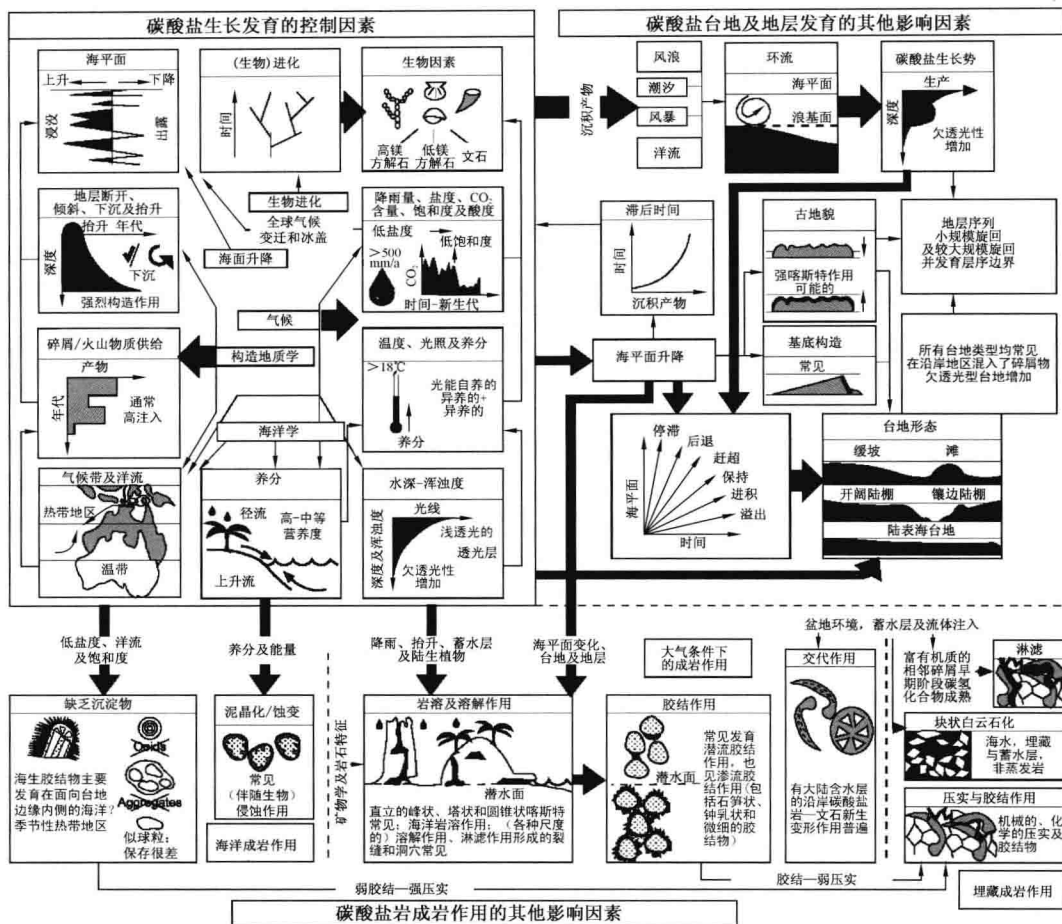


图 1-4 东南亚赤道附近热带地区的碳酸盐沉积物形成的主要影响因素(左上)、台地和地层的发育情况(右上)及它们的成岩作用(下)

此图在 Jones 和 Desrochers (1992) 的基础上修编而来,包含了更多的影响因素,及其对东南亚地区碳酸盐发育的作用。针对赤道附近热带地区的特殊特征用黑体字加以强调标识

这种复杂构造地区,伴随着大量降雨和丰富的热带植物,通常导致火山碎屑岩、硅质碎屑岩、淡水和营养物质汇聚到这个区域的沿海水域(图 1-1、图 1-2、图 1-4 和图 1-5; Tomas-cik 等,1997; Wilson 和 Lokier,2002)。本地的季风气候引起了强烈的季节性地表径流以及风和径流模式的改变(Umbgrove,1947; Park 等,2010)。这个区域位于气旋带以外,基本没有强烈的气旋风和波浪(Umbgrove,1947; Tomascik 等,1997)。构造断层、沉降和上隆结合冰川—全球海平面变化控制了局部的相对海平面变化,这会影响碳酸盐沉积、珊瑚礁生长、陆上暴露以及洪泛(Fulthorpe 和 Schlanger,1989; Wilson,2002,2008a; Park 等,2010; Wilson 和 Hall,2010)。

该区内,火山、地震活动和相关的海啸引起陆上和海上景观大的环境变化。从短期来看,这会对生态群落造成破坏,但是从长远来看,可能会带来生态机会(Wilson 和 Lokier,2002; Sat-yata,2005; Pandolfi 等,2006; Stoddart,2007)。东南亚是赤道附近仅剩的海洋通道,允许太平洋和印度洋之间通过大范围的印度尼西亚穿越洋流进行海水的交换(图 1-5; Gordon,2005)。这个地区的气候和水流系统受到全球海洋和大气现象的影响,并且/或与其发生相互作用,包括厄尔尼诺向南震荡,印度洋偶极现象,季风和热带辐合带的波动(Tudhope 等,2001; Kuhnt 等,

2004; Wang 等, 2005; Abram 等, 2009)。这些因素在不同时间尺度上改变海洋表面的温度, 使局部比周围环境温暖或变冷有一定的影响 (Gagan 等, 1998; Penaflor 等, 2009)。营养涌入和隆起区也受影响, 反过来, 引起与浮游生物的水质清澈的变化。长期的海洋 (温度、酸度及认知改变) 和大气 (CO_2) 变化在新生代发生, 处于由温室气候转变为冰室气候的过程中, 在整个新生代中长期的海洋的变化 (温度、酸度和组分的变化) 和大气 (CO_2) 的变化也会对海洋生物群和区域系统产生重大的影响 (Wilson, 2008)。目前认为, 影响海洋系统的长期和短期的变化都是全球气候变化的主要驱动力 (Gordon 等, 2003; Visser 等, 2004)。

主要的构造作用、相对海平面频繁变化、低海洋矿化度、碎屑和养分的涌入、所有海洋和温度条件下的变化都强烈地影响着区域和局部的碳酸盐的发育。根据对温暖的、较干旱的亚热带地区的研究, 这些条件不同于被认为是珊瑚礁和热带碳酸盐生长的理想条件 (Wilson, 2002)。虽然没有哪一个因素是东南亚所独有的, 但是这些因素的独特组合造成了赤道附近的碳酸盐的特殊性。本书研究评估了碳酸盐沉积以及之后的变化对赤道热带局部环境条件的反映程度 (图 1-4)。

1.3 赤道热带过程对碳酸盐沉积体系的影响

在新生代, 复杂的构造背景以及由此产生的浅水区域的变化对碳酸盐发育的分布和特点有着重大影响 (Fulthorpe 和 Schlanger, 1989; Wilson 和 Rosen, 1998; Wilson, 2002; Wilson 和 Hall, 2010)。区域构造过程通过板块运动、火山活动、伸展盆地的形成和隆起控制浅海区向热带运动、出现和消失 (Wilson, 2008; Wilson 和 Hall, 2010)。东南亚超过三分之二新生代的浅水碳酸盐岩地层 ($n = 250$) 开始具有与陆接触的特征或在碎屑岩陆架之上, 而不是孤立的台地 (Wilson 和 Hall, 2010)。印度洋—太平洋海域的大多数珊瑚礁 (53% 和 20% 多来自印度洋) 主要集中在东南亚、澳洲及印度洋浅大陆架上, 并经受附近陆地的影响 (Potts, 1983; Tomascik 等, 1997)。一般来说, 东南亚西部的海洋系统受到径流的强烈影响, 而东部群岛的海洋系统主要具有上升流的特征 (Tomascik 等, 1997)。由此产生的淡水、硅质碎屑岩、火山碎屑岩和受营养影响的碳酸盐系统是赤道热带的主要特征 (Potts, 1983; Tomascik 等, 1997; Wilson 和 Hall, 2010; Wilson, 2011)。

高降雨和陆上有机物生产导致世界范围内大量的季节性淡水、碎屑和营养物质涌入到沿海地区, 以及碎屑陆架地区 (图 3)。例如, 每年婆罗洲某一三角洲的河流输入量和沉积物排入量分别为 $500 \sim 5000 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $800 \times 10^4 \sim 8000 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ (Staub 和 Esterle, 1993; Allen 和 Chambers, 1998; Woodruffe, 2000)。四大东南亚群岛的沉积物输出量是不同的, 从 $300 \times 10^6 \sim 1650 \times 10^6 \text{ t/a}$ 变化 (图 1-5; Milliman 等, 1999)。据保守估计, 婆罗洲周围盆地含有长达 9km 的沉积物来源于该岛 (Hamilton, 1979), 并且新近纪沉积物单位面积的供应量与喜马拉雅山脉相似 (Hall 和 Nichols, 2002)。这种高径流确实阻碍了一些大陆架上碳酸盐的发育, 特别是在东南亚西部和新几内亚 (Tomascik 等, 1997)。超过 80% 的与陆相连的碳酸盐系统形成在小规模的岛屿周围 (火山的和非火山的), 与大规模的岛屿相比, 这很可能反映了更有限或周期性的涌入 (Wilson 和 Hall, 2010)。尽管有这些, 有许多现代和新生代碳酸盐的例子与碎屑流入同时存在, 并且能够适应碎屑涌入 (图 1-6; Tomascik 等, 1997; Wilson 和 Lokier, 2002; Wilson, 2002, 2005)。碳酸盐生产者的类型和其生产的系统将最终取决于碎屑和营养物输入的速率和频率, 相关的颗粒粒度以及其他的局部环境条件 (Wilson 和 Lokier, 2002; Lokier 等, 2009)。

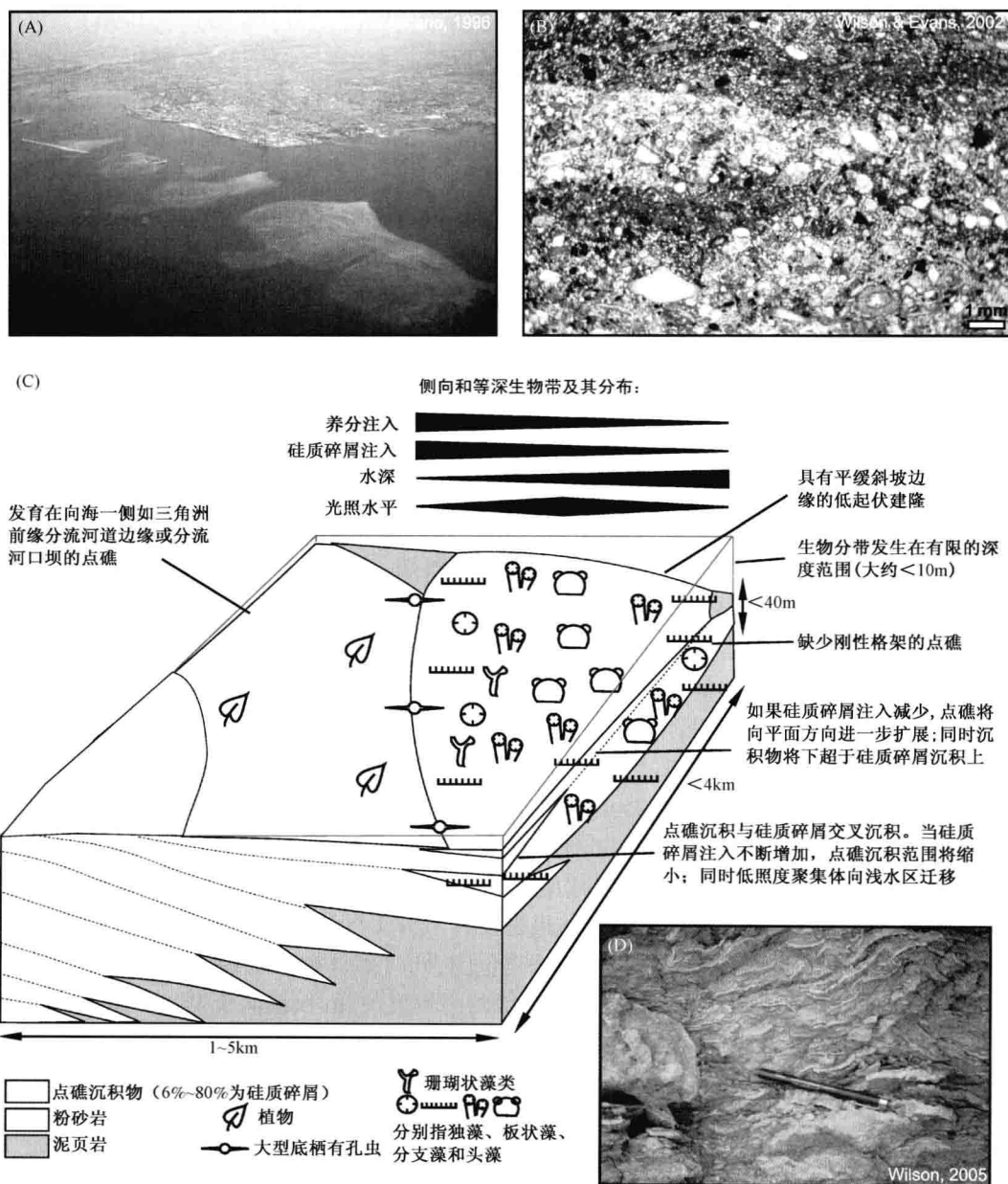


图 1-6 东南亚地区碎屑物影响沿岸碳酸盐的例子

(A) 苏拉威西碳酸盐—碎屑混合型 Spermonde 陆棚(offshore Ujung Pandang)的碳酸盐发育和注入河流的概况。观测的水平区域大约小于 10km (Wilson 和 Ascaria, 1996)。(B) Manhkalihat peninsula 地区的渐新世混合碳酸盐—碎屑沉积的显微影像 (Wilson 和 Evans, 2002)。(C) 中新世点礁的沉积模式, 只强调了主要因素。该区发育在 Borneo 的 Mahakam 三角洲向海一侧的边缘 (Wilson, 2005)。(D) 板状珊瑚席状岩(展平后, 宽高比 > 30:1 的面状珊瑚, Insalaco, 1998)。该席状岩位于某三角洲前缘点礁, 该点礁包含 60% 不可溶的细粒硅质碎屑 (Airputih AA 剖面, 据 Wilson, 2005)。用作标尺的笔长 15cm

在径流不足以阻止碳酸盐发育的地方,一系列混合碳酸盐岩—碎屑岩陆架或者局部碳酸盐岩,包括补丁礁、浅滩或塔礁就发育了(图1-6;例如,东婆罗洲的三角洲前缘;Roberts 和 Sydow,1996;Wilson,2005;或新几内亚前陆褶皱冲断带的临海位置;Pigram 等,1990)。更广泛的碳酸盐岩地层包括裙礁或堡礁,位于主要受碎屑岩控制的陆架的外侧(例如,现代的伯劳系,婆罗洲东北或 Borabi 的堡礁,巴布亚新几内亚;Leamon 和 Parsons,1986)。具有隆起的碳酸盐岩地形的近海陆地地区常见广泛的碳酸盐岩陆架(例如,现代的 Paternoster 台地和南婆罗洲的 Beraí 的石灰岩;Burollet 等,1986;Saller 等,1993)。

大陆架碳酸盐岩往往产生发育于海底高地位置,包括断层限定的古地形(Wilson 和 Hall,2010)或地层特征体,如三角洲前缘河口坝(图1-6;Wilson,2005)。洋流、内源沉积中心的迁移(例如,三角洲朵体的废弃)、海侵期及火山或构造运动的相对沉寂时期由于限制了碎屑的注入,都能促进碳酸盐的发育(Roberts 和 Sydow,1996;Wilson 和 Lokier,2002;Wilson,2005)。

尽管板状的珊瑚沉积可以包含相当细小的黏土级碎屑,但较大的底栖有孔虫和珊瑚藻相对珊瑚来说对各种粒度沉积物注入都显示出更大的容耐性(Wilson 和 Lokier,2002;Lokier 等,2009)。我们通过推断以下变化来反应不同生物体:(1)迁移率;(2)自洁能力;(3)形态组织;(4)相关的供养机制:① 沉积环境;② 基底;③ 浑浊度;④ 侵蚀;⑤ 能量;⑥ 水深;⑦ 光照度;⑧ 营养度(Wilson 和 Lokier,2002;Lokier 等,2009)。东南亚现代沿岸珊瑚显示了变化的骨架生长密度具有荧光显带,这与雨季洪水、淡水及有机质涌入相关,一些也与厄尔尼诺现象有关(Scoffin 等,1989;Tudhope 等,1995;Aycliffe 等,2004)。生长在火山地区的珊瑚应显示热液同位素特征,富铁纹层,凝灰岩物质以及与喷发事件有关的死亡面(Heikoop 等,1996;Pichler 等,2000)。就局部而言,生物多样性受限于沉积物和影响整个系统的养分因素。但是,一系列关于浑浊水体碳酸盐的研究表明:该环境下的生物多样性与干净水体的生物多样性大约有三分之二的相似性(Larcombe 等,2001)。在经常降水或强降水的区域,动植物群落(种类)主要受控于沉积补给(养分),并向异养型补给转变,而在水体上部几米内主要是光能自养生物(Titlyanov 和 Latypov,1991)。群落结构上的这些变化,在东南亚海域以珊瑚主导的新近系系统和以大型有孔虫和藻类主导的渐新世(温室效应时期)近赤道海岸碳酸盐系统都有发生。在深度上垂向收缩的生物分带现象造成的一个结果是发育了许多受径流影响的低生长幅度的系统。直立的或倾覆的礁体生物格架一般为碎屑基质包围,同时礁体框架的缺失往往产生缓和的斜坡边缘(Wilson 和 Lokier,2002)。具有陡峭边缘的高幅度建隆,仅趋向于发生在碳酸盐生产率高于碎屑物累积率,生产速率与相对海平面上升速率相当,发育刚性格架的地方(Wilson 和 Lokier,2002)。火山碎屑对碳酸盐发展的影响类似于硅质碎屑流,然而棱角状的火山碎片可能对藻类造成伤害(James 和 Kendall,1992)。在火山休眠期或有遮挡物阻止大量火山碎屑注入的区域,边缘礁普遍发育在火山机构周围(Fulthorpe 和 Schlanger,1989)。不管怎样,来自于火山灰沉积和火成碎屑流的火山碎屑的间隔注入,可能影响与陆源碎屑物质隔离的孤立碳酸盐台地(Wilson 和 Lokier,2002)。

注入东南亚海域的营养物质流不仅影响着沿岸碳酸盐的发育,同时还影响:(1)区域碳酸盐分带;(2)位于潮水和上升流影响地区的台地结构;(3)新生代时期碳酸盐的发展。总的说来,深度变浅,营养物质增多,大量珊瑚生长,但同时水体透明度下降(Wilson,2008a)。在东南亚海域,珊瑚大量生长的深度大约 20m,算得上世界上最浅的(Schlager,1992)。这与营养物质来源为径流和上升流的少营养—中营养区域的光照度很低有关,也与浮游生物生长旺盛有关(Willson,2008a)。现代珊瑚地球化学特征证明:(1)上升流(的存在);(2)浮游生物华;(3)向