

# 碳酸岩

## 有机地球化学

——在石油、天然气、煤和  
层控矿床成因及评价中的应用

傅家谟 贾蓉芬 著  
刘德汉 施继锡

科学出版社

# 碳酸岩有机地球化学

——在石油、天然气、煤和层控矿床成因及评价中的应用

傅家谟 贾蓉芬 著  
刘德汉 施继锡

科学出版社

1989

## 内 容 简 介

本书是有关碳酸岩有机地球化学方面的一部专著。作者以我国地质条件和大量分析、实验数据为基础,并参考国外最新成果,比较系统地论述了碳酸岩有机地球化学的理论与实践问题。全书共八章,包括了碳酸岩沉积学,碳酸岩中有机质和沥青的来源、赋存形式、组成、性质和演化规律,碳酸岩中的流体包裹体,碳酸岩的生物标志化合物组成,碳酸岩地层油气评价方法和指标,以及有机质在碳酸岩建造层控金属和非金属矿床中的作用等。内容丰富,资料新颖,图片精细,反映了当前碳酸岩有机地球化学方面的最新成果。

本书可供从事地球化学、沉积学、海洋学、能源科学(石油、天然气、煤)、矿床地质学的科研和生产人员及有关大专院校师生参考。

## 碳 酸 岩 有 机 地 球 化 学

——在石油、天然气、煤和  
层控矿床成因及评价中的应用

傅家谟 贾蓓芬 著  
刘德汉 施继锡  
责任编辑 周明鉴

科学出版社出版  
北京东黄城根北街16号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经营

1989年8月第一版 开本:787×1092 1/16  
1989年8月第一次印刷 印张:13 3/4 插页:7  
印数:0001—1,000 字数:301,000

ISBN7-03-001479-0/P·277

定价: 17.00元

## 前 言

海相碳酸岩地层在我国分布十分广泛,它们既是油气的重要产出层位,又发育有层控矿床,且许多层控矿床在成因上与有机质存在着密切的联系。因此,研究碳酸岩地层油气成因与评价以及金属-有机成矿作用具有重要的实践意义与理论意义。

60年代末,我们自参加西南海相碳酸岩地层油气地质综合研究以来,长期坚持了以油气评价为中心的碳酸岩有机地球化学研究工作。针对碳酸岩生油岩不同于泥岩生油岩的特殊性,以及我国海相碳酸岩地层有机质丰度低和热演化程度偏高的特点,深入研究了碳酸岩有机质的存在形式、演化特征及与油气的关系。结合我国热演化程度较低的陆相蒸发岩建造,探讨了不同演化阶段蒸发岩-碳酸岩有机质的生物标志化合物组成。较系统地研究了碳酸岩地层油气评价方法与指标;特别是固体沥青的成因、分类与应用研究,包裹体类型、成因与古油藏-层控矿床的关系等。

碳酸岩生油乃是目前油气成因研究中尚未解决的重要课题之一,因而受到世界石油地质、地球化学同行的关注。1980年在美国休斯顿召开的“碳酸岩石油地球化学与生油潜力”讨论会和J. G. Palacas在伦敦世界第十一届石油大会上(1983)所作题为“碳酸岩生油岩——地质、地球化学特征和油源对比”的专题报告,反映了这方面的主要进展。最近二、三年来,对海相碳酸岩-蒸发岩的生物标志化合物,特别是含硫化合物的研究取得重大进展,并且发现其烷烃馏分和芳烃馏分的生物标志化合物组成与我国陆相膏盐沉积惊人地相似。

目前世界上尚没有任何有关碳酸岩有机地球化学的专著。本书以我们二十年来的工作成果为基础编写,并尽可能多地收集了国内外文献资料,试图较为全面地反映这一专题的当前现状。全书共分八章,各章的执笔人为:第一章,贾蓉芬;第二章,贾蓉芬;第三章,傅家谟;第四章,刘德汉;第五章,施继锡;第六章,傅家谟;第七章,傅家谟;第八章,第一节,刘德汉,第三节,傅家谟。傅家谟审阅全书,盛国英、陈先沛、蒋九余、晏德福审阅了有关章节;吴泽霖进行了编辑加工。

二十年来的碳酸岩石油地球化学工作一直是在涂光炽教授和叶连俊教授指导下进行的,并得到石油工业部、地质矿产部同志们的指导与帮助,大量研究工作是在地球化学研究所有关同志们支持下完成的,书中照片是由十三室照相组协助完成的,谨此致谢。

# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| <b>第一章 碳酸岩的沉积特点及其有机质的来源</b> | 1  |
| 一、碳酸岩的分布与生物组成               | 1  |
| (一)碳酸盐沉积与生物组合类型             | 1  |
| (二)生物矿化作用与碳酸盐沉积             | 7  |
| 二、微生物对碳酸岩中有机质的作用            | 11 |
| (一)微生物对有机质矿化作用的类型           | 12 |
| (二)微生物在沉积物中的分布范围与作用         | 13 |
| 三、碳酸岩中有机质的来源                | 1  |
| (一)活体生物的产率与组成               | 18 |
| (二)水体中的有机质                  | 20 |
| <b>第二章 碳酸岩有机质的存在形式与组成</b>   | 25 |
| 一、宏观的有机质聚集状态                | 25 |
| (一)碳酸岩中的煤                   | 26 |
| (二)碳酸岩中的石油及沥青               | 28 |
| 二、碳酸岩中分散有机质的存在形式            | 32 |
| (一)碳酸岩矿物对有机质的作用             | 32 |
| (二)碳酸岩分散有机质的类型              | 32 |
| (三)各类有机质热演化程度及其地球化学意义       | 33 |
| 三、碳酸岩中主要的有机化合物类型            | 35 |
| (一)碳酸岩中主要有机化合物              | 35 |
| (二)碳酸岩中的氨基酸                 | 36 |
| <b>第三章 碳酸岩有机质的生物标志化合物组成</b> | 42 |
| 一、蒸发岩建造有机质的生物标志化合物组成        | 42 |
| (一)滨岸蒸发岩沉积(潟湖-萨布卡沉积)        | 42 |
| (二)内陆盐湖沉积                   | 51 |
| 二、海相碳酸盐沉积有机质的生物标志化合物组成      | 65 |
| (一)国外海相碳酸盐沉积与原油             | 65 |
| (二)中国东部海相碳酸岩与原油             | 70 |
| 三、蒸发岩-碳酸岩建造有机质生物标志化合物特征     | 75 |
| <b>第四章 碳酸岩中的沥青</b>          | 77 |
| 一、碳酸岩中沥青的分布和类型              | 77 |
| (一)原生-同层沥青                  | 78 |
| (二)后生-储层沥青                  | 79 |
| (三)岩浆热变质沥青                  | 80 |
| (四)表生-浅层氧化沥青                | 80 |
| 二、碳酸岩中沥青的热变质规律以及热演化阶段的划分与命名 | 80 |

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| (一)沥青热演化程度指标的选择与应用 .....             | 81  |
| (二)碳酸岩中沥青演化程度的划分与命名 .....            | 87  |
| 三、划分碳酸岩区油、气产出界限的若干沥青热演化指标 .....      | 90  |
| <b>第五章 碳酸岩中的流体包裹体</b> .....          | 92  |
| 一、研究意义 .....                         | 92  |
| 二、研究方法 .....                         | 93  |
| (一)偏光显微镜研究 .....                     | 93  |
| (二)荧光显微镜研究 .....                     | 97  |
| (三)显微冷热台研究 .....                     | 97  |
| (四)成分研究 .....                        | 100 |
| 三、包裹体在碳酸岩区油气勘探中的应用 .....             | 104 |
| <b>第六章 碳酸岩有机质的成岩后生演化</b> .....       | 109 |
| 一、碳酸岩有机质的成岩演化 .....                  | 112 |
| (一)湖相蒸发岩有机质的热演化 .....                | 112 |
| (二)海相碳酸岩有机质成岩变化——碳酸岩有机质的早期成岩丢失 ..... | 116 |
| (三)蒸发岩-碳酸岩早期成岩作用与浅成烃成因 .....         | 118 |
| 二、碳酸岩有机质的后生演化 .....                  | 125 |
| <b>第七章 碳酸岩地层油气评价</b> .....           | 130 |
| 一、油气评价的地球化学方法与指标 .....               | 131 |
| 二、生油岩评价 .....                        | 133 |
| (一)生油岩有机相 .....                      | 134 |
| (二)生油岩有机质丰度 .....                    | 136 |
| (三)生油岩有机质类型 .....                    | 139 |
| 三、油源对比 .....                         | 141 |
| 四、油气藏评价和油气藏举例 .....                  | 150 |
| (一)油气藏成因评价与评价标志 .....                | 150 |
| (二)油气藏举例 .....                       | 155 |
| 五、热成熟度和区域评价 .....                    | 164 |
| (一)油气形成阶段的划分 .....                   | 164 |
| (二)碳酸岩油气区域远景评价 .....                 | 165 |
| <b>第八章 碳酸岩中的有机质与层控矿床</b> .....       | 172 |
| 一、碳酸岩层控矿床中有机质的丰度和成因 .....            | 172 |
| (一)有机质的丰度 .....                      | 172 |
| (二)有机质的成因 .....                      | 173 |
| 二、碳酸岩层控矿床中有机质的组成和性质及其与成矿作用的关系 .....  | 177 |
| (一)层控矿床中伴生沥青的微量元素组成在矿源对比研究中的意义 ..... | 177 |
| (二)层控矿床中沥青演化程度与成矿作用和成矿温度的关系 .....    | 178 |
| (三)与有机质和沥青关系密切的金属与非金属层控矿床实例 .....    | 182 |
| 三、碳酸岩层控矿床成因与石油生成演化的关系 .....          | 186 |
| (一)成矿元素的活化、迁移与油田卤水 .....             | 186 |
| (二)成矿物质的沉淀聚集和石油的生物降解及热演化 .....       | 190 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| (三)成矿温度“窗”和“石油窗” ..... | 193 |
| 参考文献 .....             | 196 |
| 图版 .....               | 205 |

## CONTENTS

### PREFACE

### CHAPTER 1. SEDIMENTARY CHARACTERISTICS OF CARBONATE ROCKS

#### AND THE SOURCES OF ORGANIC MATTER ..... ( 1 )

##### 1.1 Distribution and organic composition of carbonate rocks..... ( 1 )

###### 1.1.1 Organism association types and carbonate sediments..... ( 1 )

###### 1.1.2 Organic mineralization and carbonate sediments..... ( 7 )

##### 1.2 Microbial alteration of organic matter in carbonate sediments... ( 11 )

###### 1.2.1 Organic mineralization types effected by microbial activity.... ( 12 )

###### 1.2.2 Distribution and activity of microorganisms..... ( 13 )

##### 1.3 Sources of organic matter in carbonate rocks..... ( 16 )

###### 1.3.1 Productivity and composition of living organisms..... ( 18 )

###### 1.3.2 Organisms in water body ..... ( 20 )

### CHAPTER 2. EXISTING STATE AND COMPOSITION OF ORGANIC MAT-

#### TER IN CARBONATE ROCKS ..... ( 25 )

##### 2.1 Macroscopic occurrence of enriched organic matter ..... ( 25 )

###### 2.1.1 Coal associated with carbonate rocks ..... ( 26 )

###### 2.1.2 Crude oil and asphalt associated with carbonate rocks ..... ( 28 )

##### 2.2 Occurrence of dispersed organic matter..... ( 32 )

###### 2.2.1 Effectiveness of minerals on organic matter ..... ( 32 )

###### 2.2.2 Three kinds of dispersed organic matter..... ( 32 )

###### 2.2.3 Thermal evolution of different kinds of organic matter and its geochemical significance ..... ( 33 )

##### 2.3 Major organic compound types of carbonate rocks..... ( 35 )

###### 2.3.1 Major organic compounds ..... ( 35 )

###### 2.3.2 Amino acids..... ( 36 )

### CHAPTER 3. BIOLOGICAL MARKER COMPOSITION OF ORGANIC MAT-

#### TER IN CARBONATE ROCKS..... ( 42 )

##### 3.1 Biomarker composition of organic matter in evaporite

###### sequences ..... ( 42 )

###### 3.1.1 Littoral evaporite sediments (lagoonal-sabkha sediments) ..... ( 42 )

###### 3.1.2 Inland hypersaline lacustrine sediments..... ( 51 )

##### 3.2 Biomarker composition of organic matter in marine carbonate

###### sediments ..... ( 65 )

###### 3.2.1 Marine carbonate sediments and related crude oils abroad..... ( 65 )

###### 3.2.2 Marine carbonate rocks and related oils in Eastern China ..... ( 70 )

|                                                                                                                                             |                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 3.3 Biomarker peculiarities of organic matter in evaporitic-carbonate sedimentary sequences.....                                            | ( 75 )         |
| <b>CHAPTER 4. ASPHALTS IN CARBONATE ROCKS .....</b>                                                                                         | <b>( 77 )</b>  |
| 4.1 Distribution and types of asphalts in carbonate rocks.....                                                                              | ( 77 )         |
| 4.1.1 Primary-synstratum asphalts.....                                                                                                      | ( 78 )         |
| 4.1.2 Epigenetic-reservoir asphalts.....                                                                                                    | ( 79 )         |
| 4.1.3 Igneo-thermal altered asphalts.....                                                                                                   | ( 80 )         |
| 4.1.4 Hypergenetic-shallow oxidized asphalts .....                                                                                          | ( 80 )         |
| 4.2 Thermal metamorphism rule of asphalts in carbonate rocks and<br>thermostage division and nomenclature.....                              | ( 80 )         |
| 4.2.1 Selection and application of thermal maturation indicators of<br>asphalts .....                                                       | ( 81 )         |
| 4.2.2 Division and nomenclature of thermal maturity of asphalts.....                                                                        | ( 87 )         |
| 4.3 Asphalt thermal alteration indicators used to evaluate the occur-<br>rence of crude oils and natural gases in carbonate rock areas..... | ( 90 )         |
| <b>CHAPTER 5. LIQUID INCLUSIONS IN CARBONATE ROCKS.....</b>                                                                                 | <b>( 92 )</b>  |
| 5.1 Significance of studying liquid inclusions in carbonate<br>rocks.....                                                                   | ( 92 )         |
| 5.2 Study methods.....                                                                                                                      | ( 93 )         |
| 5.2.1 Polarization microscopic study.....                                                                                                   | ( 93 )         |
| 5.2.2 Fluorescence microscopic study.....                                                                                                   | ( 97 )         |
| 5.2.3 Micro-cold and -heat stage study.....                                                                                                 | ( 97 )         |
| 5.2.4 Compositional study.....                                                                                                              | ( 100 )        |
| 5.3 Application of inclusions in exploration of oil and gas in<br>carbonate rock areas .....                                                | ( 104 )        |
| <b>CHAPTER 6. DIAGENETIC AND EPIGENETIC ALTERATION OF ORGANIC<br/>MATTER IN CARBONATE ROCKS.....</b>                                        | <b>( 109 )</b> |
| 6.1 Diagenetic alteration of organic matter in carbonate rocks.....                                                                         | ( 112 )        |
| 6.1.1 Diagenetic alteration of organic matter in lacustrine<br>evaporites.....                                                              | ( 112 )        |
| 6.1.2 Diagenetic alteration of organic matter in marine carbonate<br>rocks—loss of organic matter during early diagenesis.....              | ( 115 )        |
| 6.1.3 Early diagenesis of evaporite-carbonate rocks, and its relation-<br>ship to generation of shallow hydrocarbon .....                   | ( 118 )        |
| 6.2 Epigenetic alteration of organic matter in carbonate rocks.....                                                                         | ( 125 )        |
| <b>CHAPTER 7. EVALUATION OF OIL AND GAS IN CARBONATE ROCK<br/>STRATA.....</b>                                                               | <b>( 130 )</b> |
| 7.1 Geochemical methods and parameters for oil and gas<br>evaluation.....                                                                   | ( 131 )        |
| 7.2 Source rock evaluation.....                                                                                                             | ( 133 )        |

|                                                                                                       |                                                                                                                                          |                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 7.2.1                                                                                                 | Organo-facies of source rocks.....                                                                                                       | ( 134 )        |
| 7.2.2                                                                                                 | Abundance of organic matter in source rocks.....                                                                                         | ( 136 )        |
| 7.2.3                                                                                                 | Organic matter types of source rocks.....                                                                                                | ( 139 )        |
| 7.3                                                                                                   | Oil/oil and oil/source correlation.....                                                                                                  | ( 141 )        |
| 7.4                                                                                                   | Oil and gas reservoir evaluation and evaluation examples.....                                                                            | ( 150 )        |
| 7.4.1                                                                                                 | Oil and gas reservoir evaluation and evaluation parameters.....                                                                          | ( 150 )        |
| 7.4.2                                                                                                 | Evaluation examples.....                                                                                                                 | ( 155 )        |
| 7.5                                                                                                   | Thermal maturity and regional evaluation.....                                                                                            | ( 164 )        |
| 7.5.1                                                                                                 | Division of oil and gas generation stages.....                                                                                           | ( 164 )        |
| 7.5.2                                                                                                 | Evaluation of regional prospectives of oil and gas in carbonate<br>rock areas.....                                                       | ( 165 )        |
| <b>CHAPTER 8. ORGANIC MATTER IN CARBONATE ROCKS AND ITS RELATIONSHIP TO STRATABOUND DEPOSITS.....</b> |                                                                                                                                          | <b>( 172 )</b> |
| 8.1                                                                                                   | Abundance and origin of organic matter of stratabound deposits in carbonate rocks .....                                                  | ( 172 )        |
| 8.1.1                                                                                                 | Abundance of organic matter.....                                                                                                         | ( 172 )        |
| 8.1.2                                                                                                 | Origin of organic matter.....                                                                                                            | ( 173 )        |
| 8.2                                                                                                   | Composition and nature of organic matter occurred in stratabound deposits in carbonate rocks and its relationship to mineralization..... | ( 177 )        |
| 8.2.1                                                                                                 | Trace elemental composition of asphalts associated with stratabound deposits and its significance in ore/source correlation.....         | ( 177 )        |
| 8.2.2                                                                                                 | Thermal evolution of asphalts of stratabound deposits and its relationship to ore genesis and temperature .....                          | ( 178 )        |
| 8.2.3                                                                                                 | Examples of stratabound deposits associated closely with organic matter and asphalts.....                                                | ( 182 )        |
| 8.3                                                                                                   | Relationship between carbonate stratabound deposit genesis and petroleum generation and evolution.....                                   | ( 186 )        |
| 8.3.1                                                                                                 | Activity and migration of ore-generating elements, and their relationship to oil and gas field brine.....                                | ( 186 )        |
| 8.3.2                                                                                                 | Precipitation and concentration of ore-generating elements and their relationship to petroleum biodegradation and thermal evolution..... | ( 190 )        |
| 8.3.2                                                                                                 | "Ore genetic temperature window"and"oil window".....                                                                                     | ( 193 )        |
| <b>References.....</b>                                                                                |                                                                                                                                          | <b>( 196 )</b> |
| <b>Plates.....</b>                                                                                    |                                                                                                                                          | <b>( 205 )</b> |

# 第一章 碳酸岩的沉积特点 及其有机质的来源

本章主要讨论三个问题：(1)简略地介绍沉积碳酸岩的分布与生物组成特点,并引入生物钙化作用的生态毒理学新概念解释碳酸盐的沉积作用；(2)微生物对碳酸岩原始有机质的改造；(3)碳酸岩中有机质的来源。

## 一、碳酸岩的分布与生物组成

### (一) 碳酸盐沉积与生物组合类型

有关碳酸岩的分布与沉积模式已有很多报道。这里仅列举几个具代表性碳酸岩沉积与生物组合的实例：

#### 1. 萨布卡沉积

以波斯湾为例。这里夏季气温可达60℃以上,萨布卡卤水的含氯量达135—165%,藻坪地下水达35—110%,潟湖水为24—27%,潟湖水深1.25m,受风的影响比潮汐作用大。从潟湖到萨布卡地表下1.2—0.3m范围内有白云石、天青石、硬石膏、盐壳相继从毛细孔隙中直接沉淀或交代生成。这个地区的生物组合是：

潟湖及潮下带：由小的瓣鳃类、腹足类、马刀虫及蟹守螺腹足类的粪球粒组成。

潮间带：橡皮藻丛,已鉴定出的有微鞘藻、裂须藻、裂膜林氏藻、石囊藻(巴瑟斯特, 1971)。

#### 2. 与大陆毗连的陆缘海台地

以巴塔巴诺湾(表1.1)和我国海南岛岸礁(表1.2)为例。

#### 3. 耸立于大洋的珊瑚礁

以巴哈马(表1.3)及我国南海珊瑚礁(表1.4)为例。

#### 4. 现代深海盆地

其基本特征列于表1.5,

#### 5. 高纬度的碳酸岩

以冰岛及我国东海北部为例。

一般认为碳酸岩分布在40°S—20°N范围的温暖清洁的海水中。Askelsson(1936)发现了一套主要由瓣鳃类生物介壳组成的岩石沿冰岛海岸峡湾半岛西面分布,并分析了它们的

表1.1 古巴巴塔巴诺湾六个环境的特征描述 (巴瑟斯特, 1971)

| 特 征                      | 西 北 部           | 北 部                               | 中 部                                           | 东 南 部                  | 东 南 礁 后                 | 西 南 礁 后                 |
|--------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 沉积物类型                    | 含有基质的软<br>体动物颗粒 | 含有骨骼颗粒<br>的基质和含有<br>基质的软体动<br>物颗粒 | 含有骨骼颗粒<br>的基质: 一些<br>基质含卵圆颗<br>粒; 一些主要<br>为基质 | 卵圆颗粒砂,<br>含一些复合颗<br>粒砂 | 卵圆颗粒砂,<br>向海进入鲕状<br>骨骼砂 | 大陆架边缘骨<br>骼砂, 有些骨<br>屑砂 |
| 底质                       | 一般稳定            | 稳 定                               | 稳定到移动                                         | 稳定到移动                  | 移 动                     | 移 动                     |
| 中值颗粒<br>大小( $\phi$ )     | 砂               | 砂和粉砂                              | 粉砂: 局部粘土                                      | 砂                      | 砂                       | 砂                       |
| 分选性                      | 2—4             | 3—8                               | 4—>8                                          | <1—4                   | <3                      | 1—4                     |
| 标准偏差                     | 差               | 差                                 | 相当好                                           | 好到相当好                  | 极好                      | 极好到相当好                  |
|                          | 3—4             | >3                                | 2—3                                           | 1—2.5                  | <1                      | <1—3<br>向海下降            |
| 基质重量(%)                  | 20—60           | 40—60                             | 40—80                                         | <40                    | <20 向海下降                | 0—20 向海下降               |
| 盐度(%)                    | 33—36           | 28—32                             | 35—37(局部39)                                   | 35—37                  | 35                      | 35                      |
| 软体动物丰度<br>每300克的标<br>本个数 | 高               | 高                                 | 中 等                                           | 中 等                    | 低                       | 低                       |
|                          | 200—2 000       | 200—>2 000                        | 200—1 000                                     | 200—1 000              | <200                    | <200                    |
| 软体动物分异<br>度              | 高               | 高                                 | 中 等                                           | 低                      | 低                       | 低                       |
| 每300克的生<br>物种            | 20—60           | 20—60                             | 20—40                                         | 20—40                  | <40                     | <40                     |
| 软体动物亚组<br>合              | TA+AC           | AC                                | TA+TE                                         | TE                     | 蟹守螺                     | 蟹守螺                     |
| 有孔虫群落                    | 混杂的,<br>有些粟孔虫   | 粟孔虫类,<br>混杂的                      | 粟孔虫类,<br>有些混杂                                 | 原始虫<br>边缘粟孔虫           | 原始虫<br>双盖虫              | 原始虫<br>双盖虫              |
| 深度(m)                    | <12             | <12                               | 2—9                                           | <9                     |                         |                         |
| 植 被                      | 丰富的海龟草          | 丰富的海龟草                            | 中等的海龟草                                        | 稀罕的海龟草                 | 稀少的钙藻                   | 稀少的钙藻                   |
| 扰动度                      | 低到中等            | 低到中等                              | 低到高                                           | 中等到高                   | 高                       | 高                       |

TA: *Tegula-Arcopsis* 软体动物亚组合; AC: *Anomalocardia-Corbula* 软体动物亚组合; TE: *Tellina-Ervilia* 软体动物亚组合。

表1.2 海南岛东岸沙老珊瑚岸礁的沉积环境 (吕炳泉等, 1983)

| 项 目     | 潮 下 带                | 潮下-潮间带                              | 潮 间 带                | 潮 上 带               |
|---------|----------------------|-------------------------------------|----------------------|---------------------|
| 水动力分带   | 原生礁体相带 (包括<br>塌积相)   | 礁坪相带 (包括边缘<br>浅滩, 礁坪外带、礁<br>坪内带等亚相) | 海滩相带                 | 沿岸的沙堤及潟湖<br>相带或沼泽相带 |
| 宽 度 (m) | 2300                 | 1900                                | 70                   | 630                 |
| 各带所占%   | 51.8                 | 35.2                                | 1.3                  | 11.6                |
| 生 物 组 成 |                      |                                     |                      |                     |
| 珊 瑚     | 48.6                 | 57.3—61.2                           | 风成沙丘<br>具交错层<br>和透镜体 | 45—64.4 40          |
| 软体动物    | 17.9                 | 29.2—37.3                           |                      | 22.3—35 50          |
| 有 孔 虫   | 28.2                 | 1—3                                 |                      | 1.9—9 2.8           |
| 藻       | 4.6                  | 4—3.6                               |                      | 4.7—5 5.1           |
| 陆源碎屑    | —                    | 0—1.4                               | >50%                 | 6.7 2.1             |
| 平均气温    | 24.3℃ (20—27℃)       |                                     |                      |                     |
| 平均水温    | 25.8℃ (18.5—29.7℃)   |                                     |                      |                     |
| 降雨量     | 230mm/月 (70—350mm/月) |                                     |                      |                     |
| 盐 度     | 32.7‰ (25—37‰)       |                                     |                      |                     |
| 风 速     | 3—4.2 m/s            |                                     |                      |                     |
| pH      | 8.1—8.2              |                                     |                      |                     |
| Eh      | 260—280 mV           |                                     |                      |                     |

表1.3 巴哈马主要沉积组分间相关系数的矩阵  
( $n=216$ , 据Purdy, 1963; 转引自巴瑟斯特, 1971)

|             | 仙人掌藻  | 马刀虫类  | 其他有孔虫类 | 珊瑚     | 软体动物  | 粪球粒    | 泥集合体  | 葡萄石    | 鲕粒     | 隐晶颗粒   | 小于1/8 mm部分 |
|-------------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|------------|
| 珊瑚藻         | 0.330 | 0.089 | 0.224  | 0.701  | 0.143 | -0.187 | 0.029 | -0.098 | -0.205 | 0.094  | -0.119     |
| 仙人掌藻        |       | 0.147 | 0.295  | 0.369  | 0.420 | 0.012  | 0.216 | -0.211 | -0.360 | -0.055 | 0.166      |
| 马刀虫类(一种有孔虫) |       |       | 0.600  | -0.010 | 0.453 | 0.303  | 0.321 | -0.255 | -0.404 | -0.168 | 0.668      |
| 其他有孔虫类      |       |       |        | 0.101  | 0.454 | 0.117  | 0.323 | -0.129 | -0.508 | 0.113  | 0.549      |
| 珊瑚          |       |       |        |        | 0.292 | -0.165 | 0.058 | -0.118 | -0.210 | 0.022  | -0.141     |
| 软体动物        |       |       |        |        |       | 0.127  | 0.232 | -0.141 | -0.543 | 0.013  | 0.454      |
| 粪球粒         |       |       |        |        |       |        | 0.517 | -0.379 | -0.368 | -0.428 | 0.663      |
| 泥集合体        |       |       |        |        |       |        |       | -0.325 | -0.400 | -0.253 | 0.546      |
| 葡萄石         |       |       |        |        |       |        |       |        | -0.314 | 0.642  | -0.391     |
| 鲕粒          |       |       |        |        |       |        |       |        |        | -0.436 | -0.425     |
| 隐晶颗粒        |       |       |        |        |       |        |       |        |        |        | -0.357     |

表1.4 宣德马蹄形礁、北礁环礁沉积物及生物组成<sup>1)</sup>

| 样号     | 水深<br>(m) | 粒度特征  |       |       | 生物组成  |       |       |       |       |      |        |      |
|--------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|--------|------|
|        |           | 细砾    | 砂     | 粗粉砂   | 石珊瑚   | 软体动物  | 钙质藻   | 有孔虫   | 苔藓虫   | 棘皮类  | 八射珊瑚骨针 | 其他钙屑 |
| 82-21  | 潮间        | 22.68 | 76.65 | 0.67  | 54.78 | 10.67 | 14.51 | 17.88 | 0.093 |      | 0.28   | 1.79 |
| 82-22  | 潮间        | 3.46  | 93.38 | 0.16  | 52.38 | 12.38 | 17.97 | 14.50 | 0.06  | 0.06 | 0.40   | 1.70 |
| 82-31  | 潮间        | 11.02 | 87.84 | 1.14  | 68.33 | 12.87 | 13.91 | 2.10  | 0.52  | 0.52 | 0.35   | 1.40 |
| 82-23* | 15        |       | 48.29 | 51.71 | 58.43 | 14.13 | 14.61 | 10.11 | 1.12  | 0.16 | 0.32   | 1.12 |
| 82-38* | 19-22     |       | 44.01 | 55.99 | 36.73 | 10.06 | 41.90 | 6.56  | 0.28  | 0.97 | 0.58   | 2.92 |

• 为北礁潟湖底样

1) 黄金森、朱袁志、钟晋保、郭丽芬, 1983, 西沙群岛宣德马蹄形礁与北礁、环礁的对比研究。

表1.5 已胶结的海底碳酸盐软泥的记载(巴瑟斯特, 1971)

| 地点              | 深度 (m)                  | 时代           | 主要颗粒*       | 胶结物            | 参考文献                                                               |
|-----------------|-------------------------|--------------|-------------|----------------|--------------------------------------------------------------------|
| 东印度洋            | 229                     | —            | 抱球虫类        | —              | Murray 和 Lee(1909)                                                 |
| 太平洋             |                         | —            |             | —              |                                                                    |
| 太平洋             | 2 284                   | —            |             | —              |                                                                    |
| 东地中海<br>和 红 海   | 327—3 310<br>分析样在 2 055 | 中新世<br>(平均值) | 抱球虫<br>翼足类  | 高镁方解石<br>(平均值) | Natterer (1892—1898)<br>Fuchs (1894)<br>De Windt 和 Berwerth (1904) |
| 埃尼威托克<br>环 礁    | 800—1 000               | 上新世          | 抱球虫<br>颗石藻科 | 方解石            | Bramlette 等 (1959)                                                 |
| 大西洋海岭<br>大西洋中脊  | 300                     | 更新世          | 抱球虫<br>软体动物 | 高镁方解石          | Friedman (1964, 第 806 页)                                           |
| 红 海             | 517—1 700               | 更新世?         | 有孔虫<br>翼足类  | 文 石            | Gevirtz 和 Friedman<br>(1966, 布拉基海原,<br>第 149 页)                    |
| 巴哈马北面的<br>布莱克海台 | 1 000                   | 没注明          | 抱球虫<br>翼足类  | 高镁方解石          |                                                                    |

表1.5(续)

| 地 点   | 深 度 (m)  | 时 代             | 主 要 颗 粒     | 胶 结 物             | 考 参 文 献                               |
|-------|----------|-----------------|-------------|-------------------|---------------------------------------|
| 大西洋海岭 | 600—900  | 上新世—更新世<br>和中新世 | 抱球虫<br>软体动物 | 高镁方解石<br>低镁方解石    | Milliman (1966)                       |
| 大西洋中脊 |          |                 | 破碎的?        | 低镁方解石             | Mecanrini 等 (1968)                    |
| 巴巴多斯  | 280—440  | 晚第三纪            | 抱球虫、腹足类     | 高镁方解石             | Fischer 和 Garrison<br>(1967)          |
| 太平洋海岭 |          | 第三纪和白垩纪         | 抱球虫         |                   | Hamilton (1953, 1956)<br>和 Rex (1959) |
| 大西洋中脊 | 3 000    | 中新世和上新世         | 抱球有孔虫超科     | CaCO <sub>3</sub> | Cifelli 等 (1966)                      |
| 北大西洋  |          | 第四纪             | 抱球虫         |                   | Bartlett和Greggs(1939)                 |
| 红 海   | 89—2 704 | 第四纪             | 复 杂         | 文石, 高镁方解石         | Milliman 等 (1939)                     |

• 如果没有另加说明, 都在颗石藻软泥的基质中。

化学成分(表1.6)。

表1.6 冰岛西岸碳酸岩化学成分

| 成 分   | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO | NaCl | Na <sub>2</sub> O | CO <sub>2</sub> | 总计   |
|-------|------------------|-----------------------------------------------------------------|------|-----|------|-------------------|-----------------|------|
| 含量(%) | 4.5              | 1.0                                                             | 50.5 | 0.5 | 1.5  | 1.6               | 39.6            | 99.2 |

在这以后,许多学者(Teichert, 1958; Chave, 1967; Friedman和Sanders, 1970; Lees, 1975; Nelgon, 1978; 周自立、杜韞华, 1986)相继在世界各地发现了一些碳酸盐沉积物, 它们经古地磁恢复古纬度后, 仍属于高纬度区的沉积物。因此, 我们不能把所有碳酸岩都归结为低纬度区的沉积物。Leonard 等(1981)根据各地发现的资料作了不同纬度碳酸岩特征的对比(表1.7)。

表1.7 不同纬度带的碳酸盐沉积物特征 (Leonard等, 1981)

|           | 热 带 | 温 带  | 极 区 |
|-----------|-----|------|-----|
| 生 物 丰 度   | 大   | 小    | 小   |
| 累 积 厚 度   | 厚   | 中等   | 痕量  |
| 生 物 壳 厚   | 厚   | 中等   | 薄   |
| 沉 积 速 率   | 高   | 中等   | 低   |
| 多 样 性     | 高   | 两者之间 | 低   |
| 均 一 性     | 低   | 中等   | 高   |
| 礁         | 频繁  | 少    | 无   |
| 泥         | 高   | 低    | 痕量  |
| 鲕 粒       | 存在  | 痕量   | 无   |
| 葡 萄 石     | 低   | 痕量   | 无   |
| 泥 晶 套     | 常有  | 低    | 无   |
| 球 粒       | 常有  | 低    | 无   |
| 低 镁 方 解 石 | 常有  | 常有   | 常有  |
| 高 镁 方 解 石 | 常有  | 少有   | 少有  |
| 文 石       | 常有  | 少有   | 少有  |
| 白 云 石     | 少   | 痕量   | 无   |

我国东海北部(30°—35°N, 122°—128°E)表层沉积物中有较丰富的温带碳酸盐沉积,最高含量占样品重量的51.2%,或占总体积的70%(朱而勤等,1986)。碳酸钙的粒级分配经44个样品的测定,以粗-中砂粒组的平均含量最高,生物骨屑的组合如表1.8所示。

表1.8 各生物沉积区的骨屑组合 (朱而勤等, 1986)

| 分 区    |              | 站<br>位<br>数 | 生物骨<br>屑总量<br>(%) | 瓣<br>鳃<br>类<br>(%) | 腹<br>足<br>类<br>(%) | 翼<br>足<br>类<br>(%) | 底栖<br>有孔虫<br>(%) | 浮游<br>有孔虫<br>(%) | 介<br>形<br>虫<br>(%) | 海绵<br>骨针<br>(%) | 海<br>胆<br>(%) | 优势生物          |
|--------|--------------|-------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|--------------------|-----------------|---------------|---------------|
| 序<br>号 | 名 称          |             |                   |                    |                    |                    |                  |                  |                    |                 |               |               |
| I      | 浮游生物骨屑区      | 9           | 51.99             | 5.60               | 3.03               | 7.33               | 19.52            | 56.38            | 0.73               | 1.15            | 1.53          | 浮游有孔虫翼足类      |
| II     | 有孔虫骨屑区       |             |                   |                    |                    |                    |                  |                  |                    |                 |               |               |
|        | 底栖及浮游有孔虫区    | 7           | 21.1              | 2.94               | 0.28               | 0.42               | 60.28            | 32.88            | 0.95               | 0.79            | 0.98          | 底栖及浮游有孔虫      |
| II     | 底栖有孔虫及介形虫骨屑区 | 16          | 52                | 3.28               | 0.38               | 0.91               | 82.36            | 7.05             | 6.61               | 1.83            | 2.33          | 底栖有孔虫及介形虫     |
| III    | 软体动物骨屑区      | 12          | 35                | 15.40              | 6.05               | 0.81               | 39.54            | 6.70             | 2.36               | 5.74            | 7.57          | 瓣鳃、腹足、海绵骨针及海胆 |
| IV     | 近岸骨屑区        | 2           | 1.5               | 4.53               | 0                  | 0                  | 56.1             | 7.50             | 2.05               | 2.68            | 24.09         | 生物含量低,主要为海胆   |
| 全区平均   |              | 46          | 16.1              | 8.0                | 2.3                | 2.0                | 55.5             | 20.2             | 1.52               | 2.95            | 3.93          |               |

• 系指沉积物>0.063mm部分中的骨屑颗粒百分数

上述作者研究指出,高纬度(又称冷水型)碳酸盐沉积主要与洋流,特别是上升洋流有关。

6. 陆地湖相碳酸盐沉积

以美国犹他湖(图1.1、表1.9)及我国华北地区下第三纪湖相碳酸盐沉积(表1.10)为

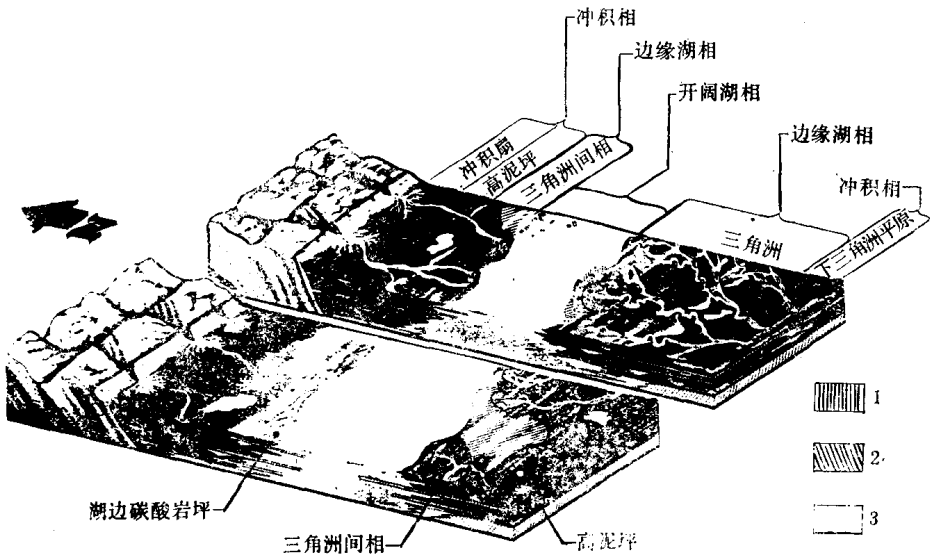


图1.1 犹他湖西岸沉积模式 (Ryder, 1976)

1. 泥质碳酸岩 2. 粒状碳酸岩 3. 砂岩 图中湖的宽度近 40km, 竖直高度放大 15—20倍

代表。

它们相当于或稍大于海水盐度的湖泊,无疑是陆上碳酸盐最大的沉积场所。

晚白垩世至第三纪早中期间,美国犹他湖东北部的沉积中心堆积了3000m的陆相碳质碎屑岩及碳酸岩建造,主要分布在湖的开阔相及边缘相,其沉积模式如图1.1,碳酸岩的沉积特点与生物组合见表1.9。

表1.9 犹他湖碳酸岩的沉积与生物组合特征 (据Ryder等, 1976, 改编)

| 相         | 开 阔 湖 相                                                  | 边 缘 湖 相                                            | 冲 积 扇 相                                |
|-----------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 沉积与生物组合特征 | 暗灰色-褐色泥质碳酸岩及钙质泥岩,具藻煤,富含分散干酪根的泥质碳酸岩呈薄一中厚层,具较多的介形虫、软体动物及虫孔 | 灰绿色钙质泥岩及含泥质的粒状碳酸岩,具油页岩,叠层石、核形石及植物碎片,含少量介形虫及软体动物、虫孔 | 叠层石藻灰岩及泥-粒状碳酸岩,具较多的核形石,痕量的软体动物及圆木碎片,虫孔 |

表1.10 华北沙河街组湖相碳酸岩特征 (周自立等, 1936)

| 相       | 滨 湖 相                |                        | 浅 湖 相              |                           |                     | 深 湖 相                         |
|---------|----------------------|------------------------|--------------------|---------------------------|---------------------|-------------------------------|
| 亚相      | 泥 坪                  | 岸 滩                    | 湖 湾                | 浅 滩                       | 半深水                 |                               |
| 岩 性     | 泥晶灰岩、泥晶白云岩、含颗粒泥晶白云岩  | 含鲕含生物砂岩、灰屑砂砾岩、螺屑白云岩    | 泥晶白云岩、含颗粒泥晶白云岩、油页岩 | 各种颗粒碳酸岩、藻云岩、藻礁云岩          | 颗粒泥晶云岩、泥晶云岩         | 页状泥质白云岩、深色纹层白云岩、富含钙质的油页岩、硬石膏岩 |
| 颜 色     | 灰、黄、褐                | 浅 灰                    | 灰—深灰               | 浅 灰                       | 灰 褐                 | 暗褐—黑                          |
| 层 理 构 造 | 纹层理<br>粒序递变层理<br>干缩缝 | 块 状<br>交错层理<br>水平层理    | 水平层理               | 块状<br>斜层理<br>无层理构造        | 水平层理                | 微细水平层理、<br>季节纹层理              |
| 非碳酸盐成分  | 呈微细条带状的<br>细粉砂及泥质    | 各种成分的砂粒<br>多见          | 粉砂及泥较多             | 可 有 砂                     | 粉砂及泥质、有机质           | 泥质多、有机质黄铁矿较多、硬石膏等盐类矿物         |
| 生物化石    | 偶见生物碎片及<br>轮藻        | 介形虫<br>厚壳螺碎屑及瓣<br>鳃类碎片 | 完整介形虫及螺            | 各种生物、藻类<br>发育、介形虫及<br>螺为主 | 生物碎片、<br>以介形虫<br>为主 | 薄壁介形虫碎片、<br>量很少、异地带入          |
| 储集性     | 差                    | 有孔隙性储集岩                |                    | 有良好的孔隙性<br>储集岩            | 有裂缝性储集岩             |                               |

表1.11 近代碳酸盐沉积环境与相应的生物组合特征

| 水 深                         | 海 相            |                                         | 含氧量 | 陆 相                 |                      |
|-----------------------------|----------------|-----------------------------------------|-----|---------------------|----------------------|
|                             | 特 征 沉 积 物      | 代表性生物组合                                 |     | 特 征 沉 积 物           | 代表性生物组合              |
| 间歇水与潟湖                      | 萨布卡型叠层石与盐湖膏盐沉积 | 异常生物种属 (能适应温度、湿度、盐度等突变的生物),以藻、菌,尤以喜盐菌为主 | 富 气 | 碳酸盐土与盐湖膏盐沉积         | 异常生物种属,有菌、藻及盐水虾      |
| 浅 水 带<br>( $<200\text{m}$ ) | 碳酸岩台地          | 珊瑚、有孔虫、珊瑚藻、软体动物好气菌等                     | 充 氧 | 牛轭湖生物薄层、浅水湖相生物滩与生物层 | 软体动物、介形虫、有孔虫、葡萄藻、好气菌 |
|                             | 生物礁            | 软体动物、介形虫、有孔虫、藻等                         |     |                     |                      |
| 深 水 带<br>$>200\text{m}$     | 碳酸盐软泥          |                                         | 缺 氧 | 碳酸盐软泥               | 浮游生物及嫌气菌             |

我国华北地区下第三纪沙河街组广泛存在着湖相碳酸岩,其沉积特征与生物组成见表1.10。

## 7. 碳酸盐土

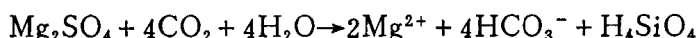
碳酸盐土(包括苏打盐碱土、镁质盐碱土、硝土、石灰土、砂姜黑土等)在我国分布面积达2 640 000 km<sup>2</sup>。它的形成与细菌、天水及地下水的淋滤、底部可燃性矿床提供的碳酸酐有关(殷乾根等,1984)。这种沉积类型有可能是陆地风化壳碳酸盐形成的重要启示。

按生物生存的必要条件:水与氧气的环境要素可将上述海陆相碳酸盐沉积物与生物组合概括于表1.11。

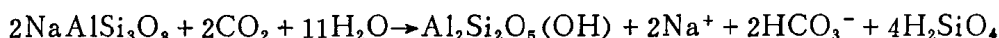
## (二) 生物矿化作用与碳酸盐沉积

### 1. 碳酸盐沉积物形成的几种途径

(1) 硅酸岩和碳酸岩的风化作用 这里主要指化学风化,CO<sub>2</sub>是地球上最常见的酸酐,是风化岩石的主要营力(Degens等,1984b)。

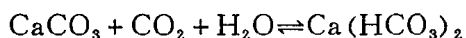


铁橄榄石



钠长石

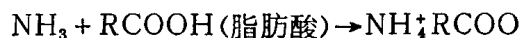
高岭石



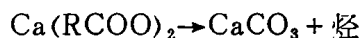
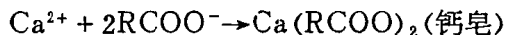
上述风化产物溶于地表径流,并被带入碱性湖泊或海洋,在高的pH值条件下生成碳酸盐沉积物。

我国松嫩盆地土壤地球化学剖面(殷乾根等,1984)代表了由风化剥蚀区到沉积区碳酸岩类型的变化,即氧化物→碳酸盐→氯化物序列,pH值也随之变化,在沉积水盆,pH达10以上。

(2) 成岩阶段的自生作用 皮壳状及交代成因碳酸钙可能与海底早期成岩作用的有机质分解有关(Berner,1968)。在早期成岩过程中,有机质腐烂分解,可以形成脂肪酸钙(钙皂),成岩反应如下:

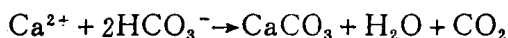


式中的R表示烃链,与Ca<sup>2+</sup>反应:



有机质在分解过程中产生的NH<sub>3</sub>及胺,也有助于提高CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>的活度,从而促使CaCO<sub>3</sub>沉淀。

(3) 生物矿化作用 碳酸岩中存在很多生物化石,不少现代生物具有钙质贝壳或房室等,因此生物矿化作用,尤其是生物与碳酸盐的关系早已受到人们的注意。过去一般用生物呼吸作用解释这一现象:



但是,据δ<sup>13</sup>C同位素的测定(图1.2及图1.3)表明,海相碳酸岩没有发生同位素分馏现象