

成都理工大学石油地质与石油工程专业系列教材

石油与天然气 有机地球化学

ORGANIC GEOCHEMISTRY OF OIL AND GAS (2nd Edition)

陈义才 李 坤 刘四兵 过 敏 罗小平 编著

第二版

地 质 出 版 社

地质与石油工程专业系列教材

石油与天然气有机地球化学

(第二版)

陈义才 李 坤 刘四兵 过 敏 罗小平 编著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书主要阐述了油气有机地球化学的基本原理及其在勘探中的应用。全书共分9章,包括以基础理论为主的沉积有机质的演化、干酪根地球化学、油气生成与演化模式、天然气地球化学、石油的化学组成和生物标志化合物等6章,第7章与第8章注重介绍油气源对比、烃源岩评价的原理和方法,第9章介绍我国油气资源分布特征及资源评价方法原理。

本书可作为高等院校石油地质、地球化学、油藏工程、地球物理等专业的教材或教学参考书,也可供相关专业的研究人员和生产人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

石油与天然气有机地球化学 / 陈义才等编著. —2
版. —北京:地质出版社, 2015. 7

ISBN 978 - 7 - 116 - 09361 - 4

I. ①石… II. ①陈… III. ①石油 - 有机化学 - 地球
化学②天然气 - 有机化学 - 地球化学 IV. ①P618. 13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 188059 号

Shiyou yu Tianranqi Youji Diqui Huaxue

责任编辑:李凯明 徐 洋

责任校对:王 瑛

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

咨询电话:(010)66554528(邮购部);(010)66554579(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

传 真:(010)66554582

印 刷:北京地质印刷厂

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:17.5

字 数:420千字

印 数:1—2000册

版 次:2015年7月北京第2版

印 次:2015年7月北京第1次印刷

定 价:28.00元

书 号:ISBN 978 - 7 - 116 - 09361 - 4

(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)

总 序

成都理工大学能源学院邀请我为 16 部“石油地质与石油工程专业系列教材”写一个总序，我想之所以邀请我来写总序，也许是因为在参加这 16 部教材编写的数十名教师中，我是年长者；也许是因为在祖国 60 余年的油气勘探开发及沉积岩石学等基础学科的教学改革和教材建设中，我是一线工作的参与者和实践者。

我于 1958 年进入成都地质学院工作，主要教学及科学研究方向为沉积学。学校 1956 年建校时定名“成都地质勘探学院”，是以重庆大学、西北大学和南京大学三所院校地质系的工科部分为基础，同时抽调北京地质学院、长春地质勘探学院部分骨干教师组建而成的。1958 年更名为“成都地质学院”，1993 年更名为“成都理工学院”，2001 年由教育部批准组建“成都理工大学”。

新中国成立之初，我国油气工业几乎为空白。经过老一辈构造地质学家、沉积地质学家、石油地质学家在学习吸收国外经典理论及引进国外油气勘探新技术的基础上，结合我国实际含油气盆地的地质、工程情况，积极推进了我国油气资源的评价和开发利用。但在 20 世纪 80 年代初期，作为油气勘探开发人才培养急需的，在沉积岩石、石油地质、含油气盆地、地下地质、测井地质及开发地质等方面，全国没有统一的教科书，甚至连学校自编教材、油田单位培训教材都难以寻觅。记得当时一同在校教学和在油田进行科学研究的老教师有罗蛰潭、童崇光、陈立官、贝丰、高纪清、陈作全、史乃光、曾允孚、夏文杰、罗志立、王允诚、赵霞飞，等等。大家通过对我国各大油田的理论实践和经验总结，出版了一系列教材，如：《沉积岩石学》（刘宝珺，1980）、《油气田地下地质学》（陈立官，1983）、《油气田地质学》（童崇光，1985）、《石油地质学》（潘钟祥、高纪清、陈荣书，1986）、《油层物理》（罗蛰潭、王允诚，1985）、《动力沉积学与陆相沉积》（赵霞飞，1992）、《板块构造与中国含油气盆地》（罗志立、童崇光，1989）、《油气测井地质》（陈立官，1990）、《油气井测试》（史乃光，1991）、《油气储层评价》（王允诚，1999）等。

进入 21 世纪，成都理工大学油气相关专业在专业建设、学科建设、实验平台建设、人才培养及实验室建设方面均取得了长足发展。除了作为“油气藏地质及开发工程国家重点实验室”的主要支撑单位，同时也建成省级“页岩气勘探开发工程实验室”和“四川盆地及周缘优质页岩气资源潜力评价协

同创新中心”，建成“油气储层地质研究平台”“油气勘探与开发实验平台”等多个中央支持、地方高校共建实验室。在油气勘探开发领域，涌现出一批优秀的中青年学者，形成了“复杂油气储层研究”“油气有机地球化学”“油气藏地质学及成藏动力学”“含油气盆地分析”“油气田开发地质”“油气藏开发评价、储层保护、油田化学”等教学与科研团队。近年来取得的部分研究成果已经整合、编入相应学科的教材中。

教材编写历来是一项艰苦的创造性工作，优秀、高质量的教材编写更为不易。“成都理工大学石油地质与石油工程专业系列教材”的编写具有良好的基础（其中12部为修订），集中体现了本校60年来取得的教学和科研成果，凝结了几代人的心血和智慧。参编教师本着“继承、发展、创新”的精神，力求选材合理、内容精当、关注前沿，并注重石油地质理论基础与油气勘探及开发生产实际的紧密结合，使本套教材成为现代能源新形势下培养基础理论扎实、实践能力强、具有创新能力的合格人才的有力工具。

中国科学院院士 劉寶珺

2015年6月15日

前 言

石油与天然气有机地球化学是应用化学原理研究地质体中的有机质、石油、天然气及其次生产物的组成、结构、性质和分布，阐述石油与天然气形成、演化和运聚的有机地球化学机理，并且运用这些知识指导油气勘探与开发的一门应用学科。自 2007 年出版《石油与天然气有机地球化学》以来，我国油气勘探领域不断扩大，尤其是近几年在北美地区页岩气革命取得巨大成功的鼓舞下，国内页岩气勘探开发取得突破性成果，推动了天然气地球化学进一步发展与完善。本教材对第一版第 9 章内容进行了调整，以油气资源分布与评价代替了有机地球化学实验技术，并对第 5 章、第 6 章和第 7 章等部分内容进一步完善，补充了新资料和新成果。

本版教材由多位老师集体编写，第 1 章和第 9 章由李坤编写，第 2 章和第 3 章由陈义才编写，第 4 章和第 5 章由过敏编写，第 6 章和第 7 章由刘四兵编写，第 8 章由陈义才、过敏、刘四兵以及罗小平共同编写。本教材在编写过程中得到西南石油大学戴鸿鸣、王顺玉、李延钧、陈世加、林峰等教授和专家的帮助，成都理工大学能源学院沈忠民、宋荣彩、王长城等教授给予了大力支持，杨知敏、王思航、郑海桥、童小俊和胡润为本教材绘制了大量图件，在此表示衷心感谢。

本教材虽然经过多次修改和校核，但由于作者水平有限，书中难免存在疏漏，恳请读者给予批评指正。

作 者

2014 年 12 月

第一版前言

石油与天然气有机地球化学是应用化学原理研究地质体中的有机质、石油、天然气及其次生产物的组成、结构、性质和分布,阐述石油与天然气形成、演化和运聚的有机地球化学机理,并运用这些知识指导油气勘探与开发的一门应用学科。石油与天然气有机地球化学是有机地球化学的重要分支,是由地质学、有机化学和生物学相互交叉渗透而形成的新兴边缘学科。它以沉积岩的有机质为主要研究对象,是研究油气成藏、分布规律和评价油气资源前景的重要原理和方法。作为有机地球化学的重要分支,石油与天然气有机地球化学的研究促进了石油有机成因理论的极大发展,并在油气勘探和远景评价中获得了很大成功,成为油气勘探中的三大基础理论之一。

本书以烃源岩、干酪根和油气为中心对象,阐述了当前石油与天然气有机地球化学的基本原理及其在勘探中的应用。全书共分9章,包括基础理论、方法原理和实验技术与应用等内容。本书是在系统总结现有教材内容和认真研究国内外油气地球化学家的理论与实践基础上编写的。在本书的章节和内容编排上,尽量突出基本知识、基本理论、基本研究方法及其与其他学科的关系,以求有利于打好基础,拓宽知识面;同时注重理论联系实际,将基本原理及其在油气勘探开发中的应用有机地结合起来。本书具有以下特色:

(1) 内容全面、重点突出

从阐述沉积有机质的演化、干酪根地球化学和油气生成与演化模式,到介绍生物标志化合物结构特征,并且通过介绍油气源对比和烃源岩评价原理以及实际应用的介绍,进一步强化了烃源岩、干酪根和油气三者之间的关系。本书不仅可作为高等院校石油地质、地球化学、油藏工程、地球物理等各专业的教材或教学参考书,也可供相关专业的研究人员和生产人员参考。

(2) 理论方法与实际应用密切结合

针对目前石油有机地球化学课程在资源勘查工程专业培养体系中的作用,在阐述有关基本原理和方法的基础上,比较详细地介绍了石油有机地球化学中常用的指标与使用条件,使学生在建立有机地球化学知识框架的同时,通过阅读本书又能够在实际工作中得到有效的指导。

(3) 体现了新兴的交叉学科的特点

本书在干酪根的结构、油气生成演化机理、生物标志物的应用与分析测试手段等方面吸收了近十几年来国内外的新理论、新成果以及新方法，并反映了石油有机地球化学研究发展的现状。

本书大纲的初稿由成都理工大学能源学院沈忠民执笔，经石油地质教研室石油有机地球化学教材编审小组讨论后，由陈义才、沈忠民、罗小平分工编写详细提纲并执笔完成。全文由陈义才（主编）统一修改，沈忠民审核。本书各章节的具体分工为：绪论和第5章的5.1~5.3节由沈忠民编写，第9章由罗小平编写，其余章节由陈义才编写。本书在编写过程中得到西南石油大学戴鸿鸣、王顺玉、李延钧、陈世加、林峰等教授和专家的帮助，成都理工大学能源学院张梢楠、伊向艺、李国蓉、王安发等给予了大力支持，刘四兵、潘泉涌、汪巍为本书绘制了大量图件，在此表示衷心感谢。

本书虽然经过多次修改和校核，但由于编者水平有限，书中难免有疏漏之处，恳请读者批评指正。

编 者

2007年6月

目 录

总 序

前 言

第一版前言

第1章 沉积有机质来源及其演化	(1)
1.1 生物圈的演变	(1)
1.1.1 生物圈的演变特征	(1)
1.1.2 主要生物类型的演化	(3)
1.2 有机碳循环	(5)
1.2.1 有机圈的概念	(5)
1.2.2 有机碳的地球化学循环系统	(5)
1.3 生物的有机化合物	(8)
1.3.1 碳水化合物	(8)
1.3.2 脂类化合物	(8)
1.3.3 蛋白质	(11)
1.3.4 木质素	(11)
1.3.5 色素	(12)
1.3.6 生物的元素组成	(13)
1.4 沉积有机质的形成环境	(14)
1.4.1 沉积有机质的概念和分类	(15)
1.4.2 沉积有机质的来源	(16)
1.4.3 影响沉积有机质丰度的主要因素	(18)
1.4.4 不同环境中有机质沉积特征	(19)
1.5 沉积有机质的演化	(24)
1.5.1 生物化学作用	(25)
1.5.2 化学作用	(27)
1.5.3 沉积有机质在成岩作用阶段的演化特征和演化结果	(30)
第2章 干酪根的组成及类型	(32)
2.1 干酪根的概念及物理性质	(32)
2.1.1 干酪根的概念	(32)
2.1.2 干酪根的物理性质	(33)
2.2 干酪根的显微组分特征	(34)

2.2.1	显微组分分类	(34)
2.2.2	干酪根主要有有机显微组分特征	(36)
2.3	干酪根的分类	(39)
2.3.1	干酪根的元素组成分类	(40)
2.3.2	干酪根的显微组分分类	(42)
2.3.3	热解色谱分类	(42)
2.3.4	分类方法讨论	(43)
2.4	干酪根的化学结构及研究方法	(44)
2.4.1	干酪根结构概念	(45)
2.4.2	干酪根结构的研究方法	(45)
2.4.3	干酪根结构的综合化学模型	(54)
第3章	油气生成与演化模式	(59)
3.1	有机质生烃演化的研究方法	(59)
3.1.1	烃源岩自然演化剖面	(59)
3.1.2	人工热压模拟实验	(60)
3.2	干酪根的热演化特征	(62)
3.2.1	干酪根元素组成的变化	(63)
3.2.2	基团结构的变化	(64)
3.2.3	自由基浓度	(65)
3.2.4	镜质体反射率	(65)
3.2.5	有机质颜色及荧光性的变化	(66)
3.3	油气生成的影响因素	(67)
3.3.1	干酪根组成与性质	(67)
3.3.2	矿物基质	(68)
3.3.3	地层温度与埋藏时间	(70)
3.3.4	地层压力	(71)
3.4	有机质成烃演化模式	(72)
3.4.1	干酪根成烃化学机理	(73)
3.4.2	有机质成烃演化的一般模式	(73)
3.4.3	特殊类型烃源岩生烃模式	(77)
第4章	天然气成因及类型判别	(82)
4.1	天然气起源与类型划分	(82)
4.1.1	天然气的起源	(82)
4.1.2	天然气的分类	(84)
4.2	天然气组成及其成因	(91)
4.2.1	气体组成特征及其影响因素	(91)
4.2.2	非烃气体组成及其成因	(94)
4.3	天然气成因类型综合判识	(97)

4.3.1	天然气成因类型的判识标志	(97)
4.3.2	不同成因类型天然气的综合判识	(104)
第5章	石油的化学组成及影响因素	(111)
5.1	石油的元素组成和馏分组成	(111)
5.1.1	石油的一般性质	(111)
5.1.2	石油的元素组成	(112)
5.1.3	原油的馏分组成	(113)
5.2	石油的族组成	(114)
5.2.1	烃类组成	(115)
5.2.2	非烃组成	(117)
5.2.3	胶质和沥青质	(119)
5.3	石油的组成类型	(120)
5.3.1	正常原油	(120)
5.3.2	非正常原油	(121)
5.4	影响石油化学组成的主要因素	(121)
5.4.1	有机质的类型	(121)
5.4.2	有机质的热演化程度	(122)
5.4.3	油气运移的影响	(123)
5.4.4	油气成藏后期的次生变化	(123)
第6章	生物标志化合物	(127)
6.1	概述	(127)
6.1.1	生物标志化合物的基本概念	(127)
6.1.2	生物标志化合物的立体化学及命名	(129)
6.2	生物标志化合物的类型	(133)
6.2.1	正构烷烃	(134)
6.2.2	无环异戊二烯类烷烃	(135)
6.2.3	萜烷	(136)
6.2.4	甾烷	(141)
6.2.5	甾烷、萜烷的图谱识别	(144)
6.3	生物标志化合物的应用	(152)
6.3.1	母源输入和沉积环境	(152)
6.3.2	确定时代	(155)
6.3.3	成熟作用	(155)
6.3.4	生物降解	(157)
6.3.5	油气运移	(158)
6.3.6	油气源对比	(159)
第7章	油气源对比	(161)
7.1	油气源对比原理与方法	(161)

7.1.1	油气源对比的原理与思路	(161)
7.1.2	油气源对比指标的选择原则	(161)
7.1.3	油气源对比的步骤	(162)
7.1.4	油气源对比的方法	(163)
7.2	气源对比	(166)
7.2.1	天然气的组成	(166)
7.2.2	稳定碳同位素	(167)
7.2.3	天然气浓缩轻烃	(170)
7.2.4	天然气稀有气体同位素	(172)
7.3	油源对比	(174)
7.3.1	不同成因类型的油源对比	(174)
7.3.2	同源不同期次的油源对比	(178)
第8章	烃源岩综合评价	(180)
8.1	烃源岩有机质丰度	(180)
8.1.1	烃源岩和有效烃源岩的概念	(180)
8.1.2	有机碳含量	(181)
8.1.3	氯仿沥青“A”	(188)
8.1.4	总烃	(189)
8.2	有机质的类型	(190)
8.2.1	干酪根类型的研究	(190)
8.2.2	沥青组分类型的研究	(193)
8.3	有机质的成熟度	(195)
8.3.1	干酪根的成熟度指标	(195)
8.3.2	可溶有机质的成熟度指标	(199)
8.3.3	生物标志化合物显示的成熟度指标	(200)
8.4	烃源岩的生烃能力综合评价	(201)
8.4.1	成因体积法估算生烃量	(201)
8.4.2	化学动力学法估算生烃量	(203)
8.4.3	生烃能力综合评价	(209)
第9章	油气资源分布及评价	(212)
9.1	油气资源概念及序列	(212)
9.1.1	油气资源概念	(212)
9.1.2	油气资源分类体系	(213)
9.2	油气资源分布特征	(215)
9.2.1	世界油气资源分布特征	(215)
9.2.2	我国油气资源分布特征	(219)
9.3	油气资源评价系统简介	(224)
9.3.1	油气资源评价的目的和基本原则	(224)

9.3.2 油气资源评价的对象与基本内容 (226)

9.3.3 油气资源评价的主要方法及关键参数..... (228)

9.4 油气资源评价的主要层次 (236)

9.4.1 盆地油气资源评价 (236)

9.4.2 含油气系统评价 (243)

9.4.3 区带评价 (248)

9.4.4 圈闭评价 (249)

参考文献 (256)

第 1 章 沉积有机质来源及其演化

沉积岩内的有机物质及其衍生物是油气地球化学的主要研究对象。沉积有机质源于生物及其代谢产物。沉积有机质在沉积、埋藏过程中, 由于地层温度、压力的作用将发生一系列的变化, 但在其演化生成石油以前, 在一定程度上仍保留着原始有机体的化学组成和结构。因此, 研究有机体各主要组分的化学组成、化学性质、生化特征以及可能的演化途径是石油与天然气有机地球化学的内容之一, 它对于阐明沉积有机质演化成烃的机理, 研究沉积盆地内烃源岩地球化学特征具有重要的意义。

当前, 石油与天然气地球化学的研究尺度已经进入分子级水平, 因此了解、掌握、熟悉有关有机地球化学和生物化学的一般知识, 对于深入认识成烃母质的化学组成及其差异, 弄清生物标志物的来源特征以及探讨油气生成过程中的地球化学过程和作用, 都是十分重要的。为此, 这里将简要地介绍活的生命有机体的主要化学组成。

1.1 生物圈的演变

地球上广泛分布着各种生物, 但其发育有一定的范围。生物的活动仅限于地球外圈, 包括接近地表的大气圈、地壳表面薄层和水圈, 合称为生物圈。生物圈跨越地壳上的大气圈、水圈和岩石圈, 是地球上最大的生物群落环境。凡是有生物活动的地方就必然有营养物质、代谢物质、分解物质和生物残骸等, 从而造成有机质在地壳上的广泛分布。

1.1.1 生物圈的演变特征

在地球发展的过程中, 生物圈经历了由低级到高级、由简单到复杂、由单一到多样的演化过程。

关于生命起源, 大多数学者接受苏联奥巴林提出的异并假说。这一学说认为, 生命是由无机物经过一系列阶段慢慢演化而来的。最早的生物是异养生物, 由这种异养生物逐渐发展演变为行光合作用的自养生物, 进一步发展演化出各种生物 (图 1.1)。

地球生物进化可以概括为构成生物的有机分子、碳化合物从 NH_3 、 CH_4 、 CO_2 和 H_2O 等演化为生物和地壳上生物由简单到复杂的演变规律, 其表现有如下几个特征:

第一, 由原始异养生物到自养生物的演化, 从而使无氧呼吸 (发酵) 发展到有氧呼吸, 为食料的供给和向高级生命形式的发展奠定了基础。当原始的异养生物, 将最初由非生物作用产生的有机物质消耗殆尽之后, 就无法维持生存, 而逐渐为自养的、进行光合作用的生物所代替。光合作用的结果, 使大气中有了游离氧, 还原性的大气圈逐渐向氧化性大气圈转变。大气中的游离氧改变了整个生态环境, 对只适应无氧环境的原生生物起到一定的破坏作用, 通过变异和选择, 生物进化到有氧呼吸, 大大提高了其新陈代谢的效能,

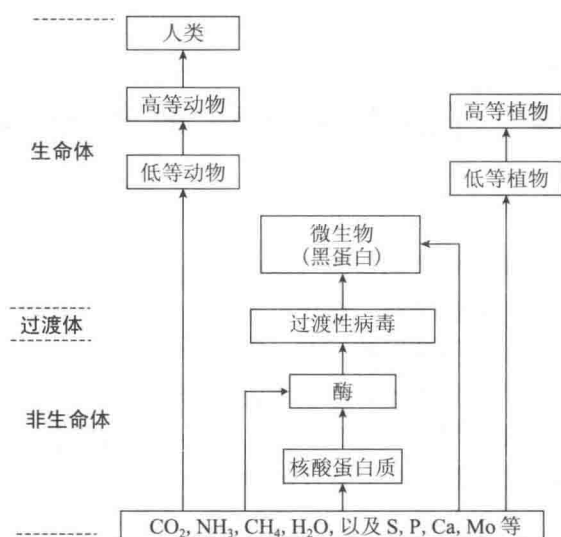


图 1.1 生物发展演化的阶梯示意图

为生物进步发展提供了有利条件。

第二，从原核到真核以及此后从无性生殖到有性生殖的发展。从原核到真核是生物由简单到复杂的转折点。一切高等的多细胞生物都是以真核细胞为基本单元的。真核生物的发育推动了生物的其他三大进化：①有性生殖的出现，大大提高了生物的变异性和适应性；②动植物的分化，形成动、植、菌三级生态系统；③从单细胞到多细胞的发展，使生物机体复杂化。

第三，动植物的分化，也是生物区系和生态系统上的最大演变。从此以后，生物进化在植物、动物和菌类三级系统的基础上进行。最早原始动物的出现大约在 10 亿年前，进入古生代，动物化石数量突然惊人地增加，包括腕足类、腹足类、三叶虫等达 1200 多种，生命演化到了相当高级的程度。

第四，从水生发展到陆生。最初的生命产生于水中，而且在很长时期内仅停留在水中。直到奥陶纪，陆地淡水中才开始出现鱼形动物，志留纪开始出现陆生高等植物，到泥盆纪，各种类型的陆地植物才普遍繁殖。

第五，人类的出现，也是生物演化的最重要的特征。生物的进化是沿多样性和适应性发展的，高等生物的产生，并不意味着低等生物的完全消亡，而是新的生物群遇到新的环境，发生适应性辐射，按许多方向进化，形成许多不同的物种。

生物圈的演化过程与地球的地质历史密切相关。在整个地质历史中，植物群的演化总是先于动物群一步。首先是植物群出现了新的形态体系，而后，动物则陆续出现。在古生代早期，当藻类在生物圈中占优势时，只有少数的海洋无脊椎动物存在，在那个时期，低等植物生产率大量过剩，因此形成大量富含有机质的暗色海相页岩。它们是寒武纪、奥陶纪和志留纪时的“正常”广海沉积物。志留纪以后，在广海环境中，植物的生产和消耗植物的动物群之间达到了平衡，因而，植物产率过剩现象就停止了。晚志留世海洋植物群和动物群的整个演化情况，与先前的海洋演化情况似乎没有很大的不同。在晚志留世和泥盆纪时，陆地植物在大陆占优势，海洋有机质的产率优势开始慢慢地消失，并一直延续到

海岸地区。而在近海盆地，多数发现于晚古生代的含煤沉积。在古生代末期，裸子植物出现并占优势，尤其是早白垩世时，适应性强而占优势的被子植物出现，导致植物过剩的产率转移到大陆地区。白垩纪 - 新近纪时大量含煤沉积形成于内陆盆地，证明了这种转移。

1.1.2 主要生物类型的演化

为了探求生油气母质的来源，对于生物发育特征和演化规律的研究仍着重于了解各类生物在漫长的地质历史时期中，随着它们的演化，其数量和产量所发生的变化，以及它们对形成沉积有机质的贡献。

据蒂索（1978）等对生物圈的演化过程与地球的地质历史相关性的研究认为，从前寒武纪到泥盆纪，有机物质的主要来源是海洋浮游植物。从泥盆纪开始，所增加的主要来源是陆地高等植物。从数量上看，形成沉积有机质的四种最重要的生物是：浮游植物、浮游动物、高等植物和细菌。

1.1.2.1 浮游植物

浮游植物可能始终是世界上有机碳的主要来源之一。约在 20 亿年以前的前寒武纪，主要是蓝绿藻和进行光合作用的细菌产生有机碳，经过寒武纪、奥陶纪、志留纪，各种海相的浮游生物、细菌和蓝绿藻仍是有机碳的主要来源，直到中泥盆世陆地植物才出现。据估计，目前海相浮游植物和细菌每年仍能产生世界上新增加的总有机碳的 50% ~ 60%。

图 1.2 是 Hunt（1972）估算的各地质时期化石浮游植物的丰度。从图上可以看出，

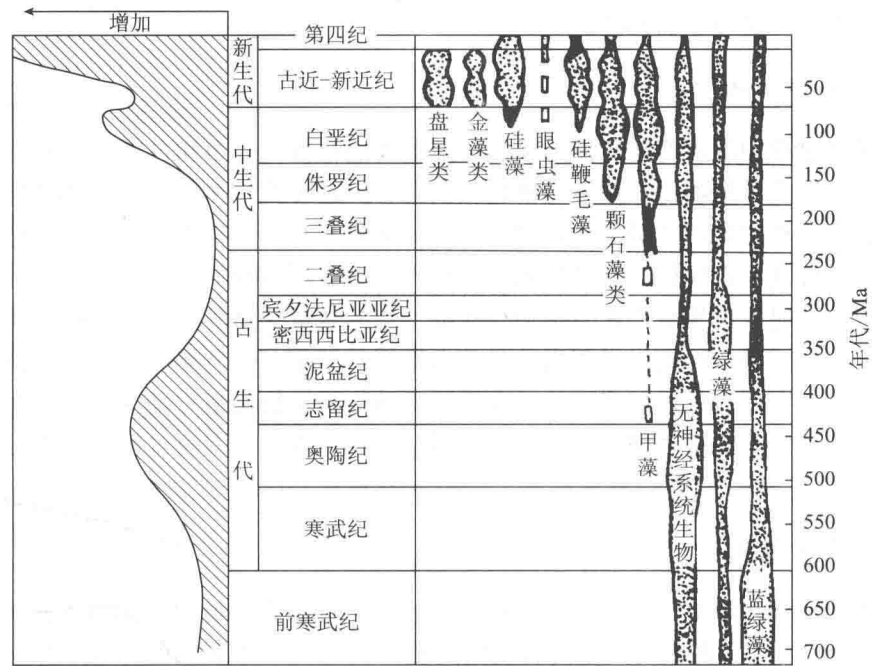


图 1.2 地质历史中化石浮游植物群和总浮游植物丰度变化
(据 Hunt, 1972)

地史上浮游植物的出现有三个高峰期。第一个高峰期大约在 8 亿年以前的前寒武纪到早古生代,主要是具有有机壁特征的浮游生物,如蓝绿藻、绿藻等。它们不具有由碳酸盐和硅质等矿物质所形成的骨骼。晚泥盆世到三叠纪时,产量较低。晚侏罗世至白垩纪出现另一个高峰,主要是钙质的浮游生物,包括颗石藻类和甲藻等;硅质浮游植物在晚白垩世大量出现。白垩纪末至早古新世,浮游植物产量有所下降,晚古新世和始新世产量又快速增加,出现第三个产量高峰,随后下降到目前的水平。

据估算,目前全球海洋浮游植物约有 1.5×10^9 t,而且其繁殖率很高,每年可产 $2 \times 10^{11} \sim 5 \times 10^{11}$ t,比全部陆地植物的繁殖量(约为 $1.59 \times 10^{10} \sim 2 \times 10^{10}$ t)大十几倍到几十倍。鉴于浮游植物的总量多而且产率大,因而,它可能是世界上有机碳的第一大来源。

1.1.2.2 细菌

细菌和藻类一样,也是生物界的先驱者,而且又是地球上分布最广、繁殖最快的一种生物。细菌的生活能力很强,它可以在温度和压力变化很大的条件下发育,也可以在咸水、淡水、近代沉积物和古代沉积岩中大量繁殖,在生理学方面显示出巨大的适应性和多变性。它可以是自养的、异养的或两者兼有的;按其生活习惯可以有喜氧细菌、厌氧细菌和通性细菌,对提供有机质特别重要的是细菌的繁殖率居一切生物之首。因此,细菌是仅次于浮游植物有机碳的第二大来源。

由于细菌相当微小,而且缺少硬体部分,因而它们很少形成化石。这样的化石记录不适合于确定整个地史中细菌的产生数量。但是在包括前寒武纪的所有地质时代中曾经发现过细菌化石的例子。化石化的细菌时常与植物组织、动物和昆虫体等有机物质共生。值得注意的是,大多数化石细菌在种属上与目前存在于相应环境中的形态相似。因此,它对提供有机质的重要性是可想而知的。

1.1.2.3 浮游动物

生物进化过程中的食物链,使异养的浮游动物的存在与分布和自养的浮游植物密切相关。在高产率的浮游植物区,浮游动物也相当发育。这种关系在前寒武纪浮游生物出现时就已存在,例如单细胞的纺锤虫和放射虫、软体动物和节肢动物等都是这种情况。在浮游植物发育的高峰期早古生代,大量发育三叶虫、笔石等浮游动物。晚侏罗世大量出现浮游的纺锤虫也与当时大量发育的浮游植物相伴随,它的数量受浮游植物产率的控制。从寒武纪开始,大多数浮游动物提供了相当数量的有机质。但是,像鱼类等动物只能提供很少量的沉积有机质,实际上可以忽略不计,高等浮游动物不仅数量相对很少,而且重要的是它们的繁殖率低。低等浮游动物的数量较大,而且其繁殖率高,因而对形成沉积有机质有一定的贡献。

1.1.2.4 高等植物

高等植物发育在陆地。它所产生的有机碳的数量与水生生物大致相当。据估算(Huc et al., 1980),海洋浮游生物产生的有机碳约有 $1.5 \times 10^{10} \sim 7.0 \times 10^{10}$ t/a,陆地高等植物产量为 $1.4 \times 10^{10} \sim 7.8 \times 10^{10}$ t/a。但是,地史上的高等植物出现时期较晚。志留纪以前,陆地只有少量的低等植物,志留纪沉积物中才出现高等植物的残体。从泥盆纪开始植物残