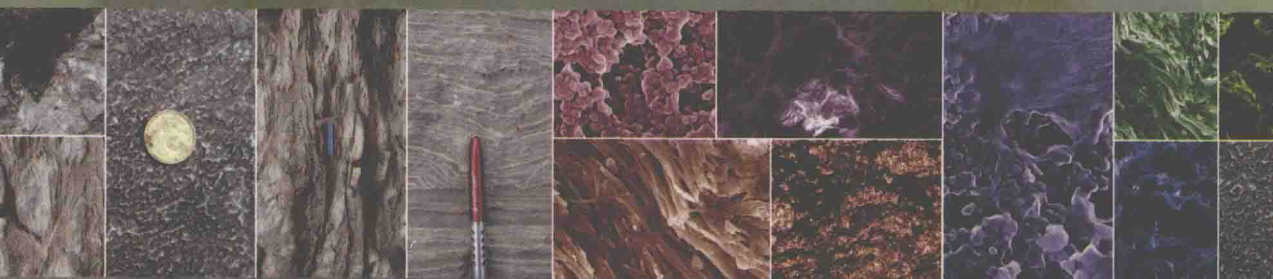


地球生物学系列

烃源岩地球生物学



谢树成 颜佳新 史晓颖 殷鸿福 等 / 著



科学出版社

地球生物学系列

烃源岩地球生物学

谢树成 颜佳新 史晓颖 殷鸿福 等 / 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统介绍了地球生物学方法在烃源岩评价中的实际应用。第一章提出了烃源岩地球生物学评价的方法体系,包括三个阶段和四个参数。三个阶段是从古生产力到沉积有机质再到埋藏有机质。四个参数则是生境型和古生产力两个生物学参数,以及古氧相和埋藏效率两个地质学参数。第二章重点对华南二叠系和寒武系这两个比较重要的烃源岩层位作精细解剖。第三章到第五章则对中元古代到三叠纪典型剖面的烃源岩进行地球生物学的评价。其中,第三章和第四章分别分析了典型剖面的生境型和古生产力这两个生物学参数,第五章分析了这些剖面的古氧相,并对烃源岩进行了地球生物学评价。第六章从地球生物学角度提出了烃源岩的一些潜在新层位。第七章对华南的大断面进行系统的地球生物学总结,提出了典型烃源岩形成的地球生物学模型。

本书适用于古生物学、油气地质学、沉积学、地层学、分子有机地球化学、生物地球化学等专业领域的工作者,是大专院校相关专业师生的重要参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

烃源岩地球生物学/谢树成等著. —北京:科学出版社, 2016. 1
ISBN 978-7-03-045837-7

I. ①烃… II. ①谢… III. ①烃源岩—研究 IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第230299号

责任编辑:胡晓春 / 责任校对:赵桂芬

责任印制:肖 兴 / 封面设计:黄华斌

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年1月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016年1月第一次印刷 印张:25 1/4

字数:598 000

定价:198.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

我国陆相油气资源和陆相生油理论为国民经济和人类石油地质理论的发展做出了历史性贡献。海相油气是国际上一个十分重要的领域，因我国海相碳酸盐岩存在诸多复杂问题而影响了海相油气资源的勘探开发。要实现我国海相油气的新突破，不能照搬国外海相油气勘探的经验，必须立足实际，探索有中国特色的海相油气勘探理论与技术方法。在这种背景下，早在“十一五”期间中国石化在“稳定东部，发展西部，准备南方，开拓海外”的油气资源战略的指导下，对中国南方海相油气进行了一系列的前瞻性探索研究工作，我有幸参与组织了这些基础性的研究工作，对十余年来我国在海相油气资源新理论新方法方面取得的重要进展感到由衷的高兴。

由中国地质大学（武汉）谢树成教授等组织完成的《烃源岩地球生物学》从一个侧面反映了我国在海相油气资源新理论新方法探索方面的突出进展。中国南方海相碳酸盐岩烃源岩经历了长期的地质演化，热成熟度高，基于残余有机质的传统烃源岩评价方法面临许多挑战。针对这一长期以来人们所面临的问题，中国地质大学（武汉）的研究集体在殷鸿福院士的领导下，将地球生物学新思想引入到烃源岩评价中。本书就是这个集体十余年来完成的部分研究成果的系统总结。从中可以看出这个集体所具有的开拓创新精神，他们不仅在努力推动我国地球生物学这一新兴学科的发展，还进一步将地球生物学理论与油气资源这一重要实践结合起来，勇于探索的精神可嘉，获得的初步成果可喜。

地球生物学把生物圈与地球的其他圈层联系起来，从地质角度研究不同时空尺度生物与环境之间的相互作用与协同演化，特别涉及生物过程与地质过程的耦合。地球生物学这个思想的一个最好体现就是烃源岩的形成过程。正如作者在前言中提到的，烃源岩的形成过程与有机质的形成和保存这两个基本的地球生物学过程密切相关：有机质的形成直接体现了自养生物与水圈和大气圈的相互作用，而有机质的保存则集中体现了好氧和厌氧微生物功能群对环境的作用。因此，烃源岩的形成实际上体现了从初级生产力到沉积有机质，再到埋藏有机质这一过程中，生物（特别是微生物）与环境的相互作用过程，因而是典型的地球生物学过程。这是本书从地球生物学角度评价烃源岩的理论基础。

基于以上的地球生物学新思想,作者提出了烃源岩地球生物学评价的方法体系,随后重点选择中元古代到三叠纪的一些典型剖面从生境型、古生产力、古氧相等方面进行了系统分析,并进行地球生物学的评价,特别关注了华南二叠系和寒武系这两个比较重要的烃源岩层位,由此从地球生物学角度提出了烃源岩的一些潜在新层位,并建立了一些典型烃源岩形成的地球生物学模型,实现了从传统地质模型到地球生物学模型的转变。从中可以看到许多与海相烃源岩有关的新思路、新发现和新进展,这对我们进一步揭示海相油气勘探的新领域无疑具有重要的启迪作用。

古生物学与地层学作为走在我国地质学前列的代表性学科,对油气资源的研究发挥了极其重要的作用,从古生物学发展而来的地球生物学已经开始对油气资源的研究发挥新一轮的推动作用。因此,我相信本书的出版必将进一步推动我国烃源岩的研究,并通过实践进一步推动我国地球生物学的快速发展。

金之钢

2015年8月

前 言

在《地球生物学：生命与地球环境的相互作用和协同演化》一书中，我们已经介绍了地球生物学的初步学科体系，重点阐述了地球生物学两个重要分支学科——分子地球生物学和地球微生物学的主要内容和研究进展，也对部分典型生态系统的地球生物学过程和若干重大地质突变期的地球生物学过程进行了解剖。本书中我们将地球生物学的前沿科学研究与油气资源这一国家目标相结合，开展烃源岩形成的地球生物学过程的实践研究工作。

烃源岩是含油气系统和油气成藏的物质基础，其形成过程与有机质的形成和保存这两个基本的地球生物学过程密切相关。这两个基本过程都与不同微生物功能群及其与环境的作用有关。古海洋有机质的形成直接体现了自养生物与水圈和大气圈的相互作用，而有机质的保存与水-沉积物界面的氧化还原条件密不可分，集中体现了好氧和厌氧微生物功能群的作用。因此，烃源岩的形成实际上体现了从初级生产力到沉积有机质，再到埋藏有机质这一过程中，生物（特别是微生物）与环境的相互作用，因而是典型的地球生物学过程。这是地球生物学方法评估烃源岩的理论基础，其方法是从恢复①初级生产力到②沉积有机质再到③埋藏有机质的过程来正演烃源岩形成的具体过程，估算其最大资源量，并与传统的从残余有机碳的反演方法进行对比。

遵循这样的思路，本书第一章详细介绍了烃源岩的地球生物学评价体系，包括三个阶段和四个参数。三个阶段是从古生产力到沉积有机质再到埋藏有机质。四个参数则是生境型和古生产力两个生物学参数，以及古氧相和埋藏效率两个地质学参数。本章还初步总结了后续几章评价过程中形成的一些规律性认识，特别是对比了与传统反演法的异同点。第二章重点对华南二叠系和寒武系这两个比较重要的烃源岩层段作精细解剖，从而进行烃源岩地球生物学半定量评价的实践。第三章到第五章则对中元古代到三叠纪典型剖面的烃源岩进行地球生物学的评价。其中，第三章和第四章分别分析了典型剖面的生境型和古生产力这两个生物学参数，第五章则分析了这些剖面的古氧相，并对烃源岩进行了地球生物学评价。在前几章对不同时代评价的基础上，第六章提出了烃源岩的一些潜在新层位，并分析了地球生物学过程。第七章则对华南的大断面进行系统的总结，提出了典型烃源岩形成的地球生物学模型。

烃源岩地球生物学评价是一个系统的多学科结合的研究工作。本书既有生境型、生态地层学等古生物学理论和方法的应用，也有生物地球化学方面的大量分析测试。在古生产力、古氧相这两个烃源岩评价的关键环节上，均将古生物学与地球化学工作进行结合，从而使得研究工作能够得到不同学科、不同指标的相互验证。本书既有地球生物学技术方法的介绍，也有典型剖面的系统解剖；既有现代过程的总结和研究，也有地质过程的深入分析。全书各章节具体分工参见目录。全文由谢树成统一修改和统稿。

烃源岩地球生物学的工作是中国地质大学（武汉）地层古生物学研究集体长期研究的系统总结，历经多年的艰苦探索，先后受到中国石油化工股份有限公司前瞻性研究项目、国家自然科学基金委员会一系列不同类型项目（包括国家创新研究群体项目 40921062、国家杰出青年科学基金项目 40525008 和一系列的国家自然科学基金重点项目等）、科技部 973 计划重要科学前沿领域项目（2011CB808800）、高等学校生物地质与环境地质学科创新引智基地项目（111 计划，B08030）等的联合资助。

在研究和撰写过程中，得到了孙枢院士、戎嘉余院士、陈旭院士、王铁冠院士、金振民院士、马永生院士、金之钧院士、牟书令总裁等的大力支持和指导。国际同行 Richard Pancost、Paul Wignall、Lee Kump 等参与了部分合作研究。在此，向他们致以诚挚的谢意。本书的完成虽经历了数年的修改，但仍感粗糙，只能作为地球生物学领域抛砖引玉的材料。不当之处，敬请批评指正。

目 录

序

前言

第一章 烃源岩评价的地球生物学理论和方法	(1)
第一节 烃源岩形成的地球生物学过程及其评估方法	谢树成 (1)
一、古生产力的评估	(3)
二、沉积有机碳的估算	(11)
三、埋藏有机碳的估算	(13)
第二节 古氧相的定量和结构分析	谢树成 (17)
一、氧化还原条件的定量和分类	(17)
二、水体的缺氧和硫化事件	(17)
三、从沉积到早期成岩的氧化还原条件	(18)
第三节 烃源岩地球生物学半定量评价参数	殷鸿福 谢树成 (19)
一、地球生物相	(19)
二、地球生物相的四项参数及其替代指标	(22)
三、四项参数各替代指标值的分级	(27)
第四节 烃源岩地球生物学半定量评价实践	殷鸿福 谢树成 (29)
一、评价地区和剖面	(29)
二、半定量评价的讨论	(30)
三、半定量评价结论	(32)
参考文献	(32)
第二章 二叠纪和寒武纪典型烃源岩的地球生物学解剖	(40)
第一节 二叠系烃源岩的地球生物学解剖	(40)
一、生境型	李 波 颜佳新 (40)
二、生产力及其组成	颜佳新 胡超涌 (46)
三、埋藏环境和有机埋藏量	黄俊华 周 炼 (49)
四、烃源岩地球生物学评价	殷鸿福 谢树成 李 波 (59)
第二节 寒武系烃源岩的地球生物学解剖	徐思煌 (62)
一、地质与地球化学特征	(62)
二、地球生物学参数	(69)
三、烃源岩地球生物学评价	(74)
参考文献	(80)
第三章 中元古代至三叠纪典型剖面的生境型	(83)

第一节 中元古代	(83)
一、华北地台中部中元古代地层发育特征与年代约束	史晓颖 (83)
二、华北地台中部中元古代碳酸盐岩地层的生境型	史晓颖 (87)
三、河北平泉剖面生境型	杜远生 郭 华 (95)
第二节 埃迪卡拉纪—寒武纪	王 约 王训练 (99)
一、埃迪卡拉纪剖面	(99)
二、寒武纪剖面	(105)
第三节 奥陶纪—志留纪	苏文博 李志明 傅力浦 (111)
一、湖北宜昌黄花场-王家湾奥陶纪剖面	(115)
二、湖南桃源九溪奥陶纪剖面	(120)
三、四川旺苍王家沟-鹿渡志留纪剖面	(126)
四、陕西紫阳芭蕉口-皮家坝志留纪剖面	(130)
第四节 泥盆纪—石炭纪	(133)
一、广西桂林杨堤泥盆纪剖面	龚一鸣 (133)
二、四川甘溪泥盆纪剖面	龚一鸣 (136)
三、广西南丹巴平和么腰石炭纪剖面	张雄华 (141)
四、广西隆安石炭纪剖面	张雄华 (144)
第五节 二叠纪—三叠纪	(147)
一、广西来宾铁桥二叠纪剖面	李 波 颜佳新 (147)
二、四川华蓥山二叠纪剖面	颜佳新 李 波 (153)
三、贵州罗甸纳水二叠纪剖面	颜佳新 李 波 (157)
四、贵州罗甸关刀二叠纪—三叠纪剖面	宋海军 童金南 (161)
五、四川广元上寺三叠纪剖面	江海水 赖旭龙 阎春波 (163)
第六节 中元古代至三叠纪生境型变化规律	颜佳新 (167)
一、生境型的划分和识别	(167)
二、一些特殊生境型的特征和识别	(168)
三、生境型的时空变化	(169)
参考文献	(169)
第四章 中元古代至三叠纪典型剖面的古生产力	(174)
第一节 现代海洋生产力变化特征	王红梅 邱 轩 (174)
一、现代海洋生产力概述	(174)
二、现代海洋初级生产力分布概况	(174)
三、我国各海域初级生产力的分布特征	(178)
四、影响海洋初级生产力的环境因素	(180)
五、影响海洋初级生产力的生物因素	(181)
第二节 各时代生物碎屑指示的古生产力	(182)
一、中元古代	杜远生 史晓颖 郭 华 (182)
二、埃迪卡拉纪—寒武纪	王 约 王训练 (188)

三、奥陶纪—志留纪	苏文博 秦 松 刘 采	(189)
四、泥盆纪—石炭纪	龚一鸣 张雄华	(196)
五、二叠纪—三叠纪	颜佳新 宋海军 赖旭龙 童金南 江海水	(200)
第三节 各时代地球化学指标指示的古生产力	胡超涌	(202)
一、海洋古生产力的地球化学指标		(202)
二、各典型剖面古生产力重建		(207)
第四节 华南古海洋生产力的时空演变	谢树成 胡超涌	(218)
一、古生产力的时间演变		(218)
二、古生产力的空间变化		(220)
三、古生产力与生物多样性的关系		(221)
参考文献		(222)
第五章 中元古代至三叠纪典型剖面的古氧相和烃源岩评价		(229)
第一节 各时代典型剖面的古氧相特征		(229)
一、中元古代	史晓颖 杜远生 郭 华	(229)
二、埃迪卡拉纪—寒武纪	王 约 王训练	(238)
三、奥陶纪—志留纪	苏文博 王 巍 马 超	(239)
四、泥盆纪—石炭纪	张雄华 龚一鸣	(243)
五、二叠纪—三叠纪	赖旭龙 宋海军 颜佳新 江海水 童金南	(245)
第二节 各时代碳同位素与古埋藏	黄俊华	(247)
一、有机碳埋藏分数		(247)
二、各典型剖面的碳同位素组成		(247)
三、有机碳埋藏量与烃源岩和生物多样性的关系		(260)
第三节 各时代烃源岩的地球生物学评价		(263)
一、中元古代	杜远生 史晓颖 郭 华	(263)
二、埃迪卡拉纪—寒武纪	王 约 王训练	(269)
三、奥陶纪—志留纪	苏文博	(276)
四、泥盆纪—石炭纪	龚一鸣 张雄华	(281)
五、二叠纪—三叠纪	宋海军 颜佳新 赖旭龙 江海水 童金南	(283)
参考文献		(286)
第六章 烃源岩发育的若干新层位及其地球生物学过程		(291)
第一节 中元古代主要的微生物岩类型及其地球生物学过程	史晓颖	(291)
一、华北地台中元古代主要的微生物岩类型与生态分布		(291)
二、层状凝块石		(292)
三、黑色生物纹层石		(299)
四、微生物岩礁		(306)
第二节 新元古代的甲烷渗漏与烃源岩的形成	王家生	(311)
一、现代海底甲烷渗漏		(311)
二、新元古代甲烷渗漏事件的地质记录和分布		(315)

三、新元古代甲烷渗漏作用与烃源岩的形成	(320)
第三节 二叠纪栖霞组含海泡石灰岩	颜佳新 (323)
一、栖霞期生境型空间分布和古生产力恢复	(323)
二、地球生物相空间分布与烃源岩评价	(331)
第四节 二叠纪-三叠纪之交的钙质微生物岩与烃源岩	王永标 (336)
一、钙质微生物岩的层位和古地理分布	(336)
二、钙质微生物岩的类型、微生物化石与古生产力水平	(340)
三、微生物岩有机质的沉积和埋藏条件以及赋存形式	(345)
四、微生物岩烃源岩形成的地球生物学过程和生烃潜力评价	(349)
参考文献	(352)
第七章 华南大断面地球生物相与典型烃源岩形成的地球生物学模型	(364)
第一节 下组合地球生物相特征	解习农 颜佳新 (364)
一、华南埃迪卡拉纪—早古生代古地理背景	(364)
二、华南下组合典型剖面地球生物相特征	(365)
三、华南下组合大断面地球生物相综合特征	(367)
第二节 上组合地球生物相特征	解习农 颜佳新 (373)
一、华南晚古生代—三叠纪古地理背景	(373)
二、华南上组合典型剖面地球生物相特征	(375)
三、华南上组合大断面地球生物相综合特征	(376)
第三节 典型烃源岩形成的地球生物学过程及其模型	谢树成 冯庆来 (381)
一、碳-硅-泥-(磷)型烃源岩	(381)
二、动物危机期间的微生物岩和泥质烃源岩	(383)
三、冰期后泥质烃源岩	(385)
四、硅-泥质烃源岩和含海泡石碳酸盐烃源岩	(387)
五、与甲烷厌氧氧化有关的微生物岩和泥质烃源岩	(388)
参考文献	(390)

第一章 烃源岩评价的地球生物学理论和方法

烃源岩是含油气系统和油气成藏的物质基础，国内外油气地质学家对烃源岩进行了多方面的研究（Clegg *et al.*，1997；Glikson，2001；Younes，2003；Sharaf，2003；Riediger *et al.*，2004；Wilde *et al.*，2004；Fildani *et al.*，2005；Younes and Philp，2005；Rabbani and Kamali，2005；Lash and Engelder，2005；Ercegovac *et al.*，2006）。当前，人们已经认识到排烃过程和排烃效率可能是评价烃源岩更重要的方面（Leythaeuser *et al.*，1988；Banerjee *et al.*，2000），并认识到应用残余有机质反演烃源岩的生烃潜力存在一定局限性。

石油地质学常用的反演方法，是从现今岩石中测得的有机碳（TOC）含量等指标反推出有机质在深埋裂解前的资源量。反演方法需要 TOC 含量、有机质类型、有机质的成熟度、各类有机质的恢复系数等参数的支撑。除了这种反演方法外，我们还可以从生物的生产力到沉积有机质，再到埋藏有机质这个过程来正演有机质的形成和演化。要深入研究有效烃源岩和优质烃源岩的生烃潜力，不仅要残余有机质来反演，还应该正演烃源岩形成的动力学过程。

我国海相碳酸盐岩烃源岩形成于多旋回的叠合盆地。烃源岩的时代老、埋藏深、有机质成熟度高（金之钧等，2005；马永生，2006），致使在我国南方高成熟海相地层中有相当部分有机地球化学参数已不能反映其原有的地球化学意义。由于存在以上问题，致使人们对成烃有机质的来源、发育条件及成烃机制不十分清楚，评价低有机质丰度岩石的生烃能力的方法仍在摸索，恢复高演化有机质的生烃历史和成烃阶段需要深入研究。针对这些难题，不断发展新的理论、技术和方法，提出更适合我国海相环境的成盆、成烃和成藏理论势在必行。地球生物学的提出和发展为这项工作的开展提供了机遇。

第一节 烃源岩形成的地球生物学过程及其评估方法

烃源岩是一种富含有机质、在自然条件下已经产生或可能产生石油和天然气的沉积岩（Hunt，1979）。与非烃源岩相比，海相烃源岩多形成于相对缺氧的环境，保存了各类海洋微生物功能群的各种形式有机质（Stein，2004；Katz，2005）。高度富集有机质的海相烃源岩实际上是一类集中了地质时期各种微生物及其遗迹的地质记录。

在海相烃源岩形成过程中，有机质的变化过程可以概括如下（图 1.1）：海水中的各种生物在不同气候和环境背景下形成生产力，并有不同的生产力组成，构成了气-水界面的地球生物学过程。这些生物通过水柱向下沉降到达沉积物表面。在到达水-沉积物界面时，大部分有机质被消耗掉，只有少部分有机质在沉积物中得以沉积下来，形

成沉积有机质。这些沉积下来的有机质经历了成岩过程各类微生物的作用，又有许多有机质被消耗，最终只有极少部分有机质被埋藏起来，形成了埋藏有机质，反映了水-沉积物界面的地球生物学过程。这些埋藏有机质在深埋过程中，经历热化学作用，才形成了各种气体和油等。当受后期构造作用抬升地表时，岩石中的这些有机质又受到风化作用，最终形成目前在岩石中残留下来的残余有机质。

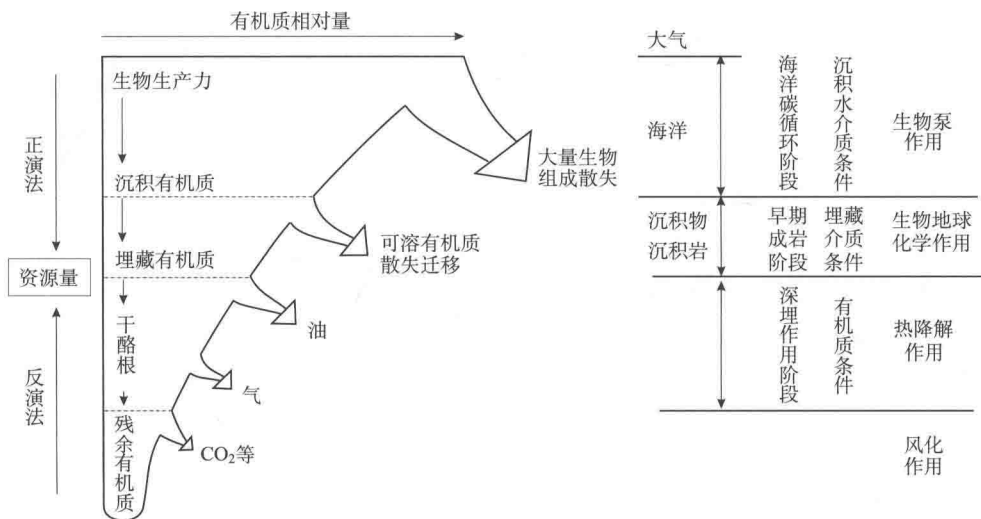


图 1.1 沉积岩中有机质的形成及其变化过程

因此，作为油气资源物质基础的烃源岩，其形成过程与有机质的形成和保存这两个基本的地球生物学过程密切相关 (Banerjee *et al.*, 2000; Stein, 2004; Katz, 2005)。这两个基本过程都与不同微生物功能群 (如自养与异养的，或者好氧与厌氧的等) 有关：古海洋有机质的形成 (古生产力) 直接体现了光合生物 (自养生物) 与水圈和大气圈的相互作用；有机质的保存与水-沉积物界面的氧化还原条件 (古氧相) 密不可分，集中体现了生物与环境的相互作用，水-沉积物界面及其以下的氧化作用带、硝酸盐还原作用带、硫酸盐还原作用带、甲烷形成带等精细刻画了不同微生物功能群的地质过程。与烃源岩相比，非烃源岩相对简单，往往只记录了部分微生物作用带 (如氧化作用带)。特别是，与海相烃源岩形成有关的有机质埋藏主要发生在水-沉积物界面附近 (Tyson, 2005)，界面过程是所有地质过程的关键环节。从环境角度来说，界面附近的环境条件受到多种系统的综合影响，表现得最不稳定，变化极其繁杂，生物与环境相互作用呈现出多样化和多变性的特点。从生物学角度分析，现代微生物往往集中在一些重要界面上，如水-沉积物界面、气-土界面等，这些界面又是研究微生物地质过程的主要环节，也是目前人们认识最薄弱的地带。

海相烃源岩不仅记录了微生物通过古生产力、古氧相和古埋藏环境对地球表层系统所产生的作用，而且还记载了地质时期微生物通过各种生物地球化学循环对古海洋和古大气环境的影响。自太古宙以来，微生物对地球表层系统的作用可以通过碳循环和硫循环突出地表现出来，与此有关的记录是研究地质时期微生物与环境相互作用的极佳载体。

在中元古代富 H_2S 海洋环境 (Arnold *et al.*, 2004) 中形成的烃源岩为解剖特定地质时期硫化海洋中的微生物过程及微生物对硫循环和海洋环境作用提供了重要载体。在显生宙某些重大地质突变期及其前后富 CO_2 地质环境 (Retallack, 2002; Berner, 2003) 形成的烃源岩则记录了微生物通过碳循环影响大气圈的地质过程。在新元古代冷泉等环境中形成的烃源岩及其相关沉积则开启了研究极端环境微生物地质过程的大门。因此, 不同时期形成的烃源岩可以看作该时期的一个地球生物学事件, 记录了详细的地球生物学过程。

从初级生产力的形成到沉积有机质, 再到埋藏有机质, 无不体现出生物 (特别是微生物) 与环境的相互作用, 是典型的地球生物学过程。这是地球生物学方法评估烃源岩的理论基础, 其方法是从恢复初级生产力到沉积有机质再到埋藏有机质的过程 (即地球生物学三阶段) 来正演烃源岩形成的具体过程, 估算其最大资源量, 并与传统的从残余有机碳的反演方法进行对比 (图 1.1)。为了增强地球生物学正演法结果的可靠性, 减少计算误差, 可以采用两种独立方法加以验证。一种方法是根据各种地球生物学方法先计算生产力, 再根据生产力计算出沉积有机质, 最后在计算成岩期消耗有机质的基础上, 由沉积有机质计算出埋藏有机质。第二种方法则是跳过生产力与沉积有机质, 直接根据地层中保存的钼含量或其同位素组成计算出有机埋藏量, 以避免因生产力和沉积有机质的计算误差使埋藏有机质的计算误差增大。这两种正演方法可以互相比较。

一、古生产力的评估

初级生产力或初级有机碳在现代生物学中的单位为 $\text{g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 换算为古代资源量单位约相当于 $\text{t C}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。现代初级生产力范围约 $1 \sim 1000 \text{ t C}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 由寒区向暖区增加, 由深海向陆架向河口区增加, 相差可达数百倍。因此, 对于地史时期有机碳产量 (生产力 $\times$ 年数) 的估算, 只需精确到 10 的数量级即可。一个中等生产力的区域, 面积 100 km^2 , 延续 10 万年, 则其有机碳总产量可达数十亿吨。

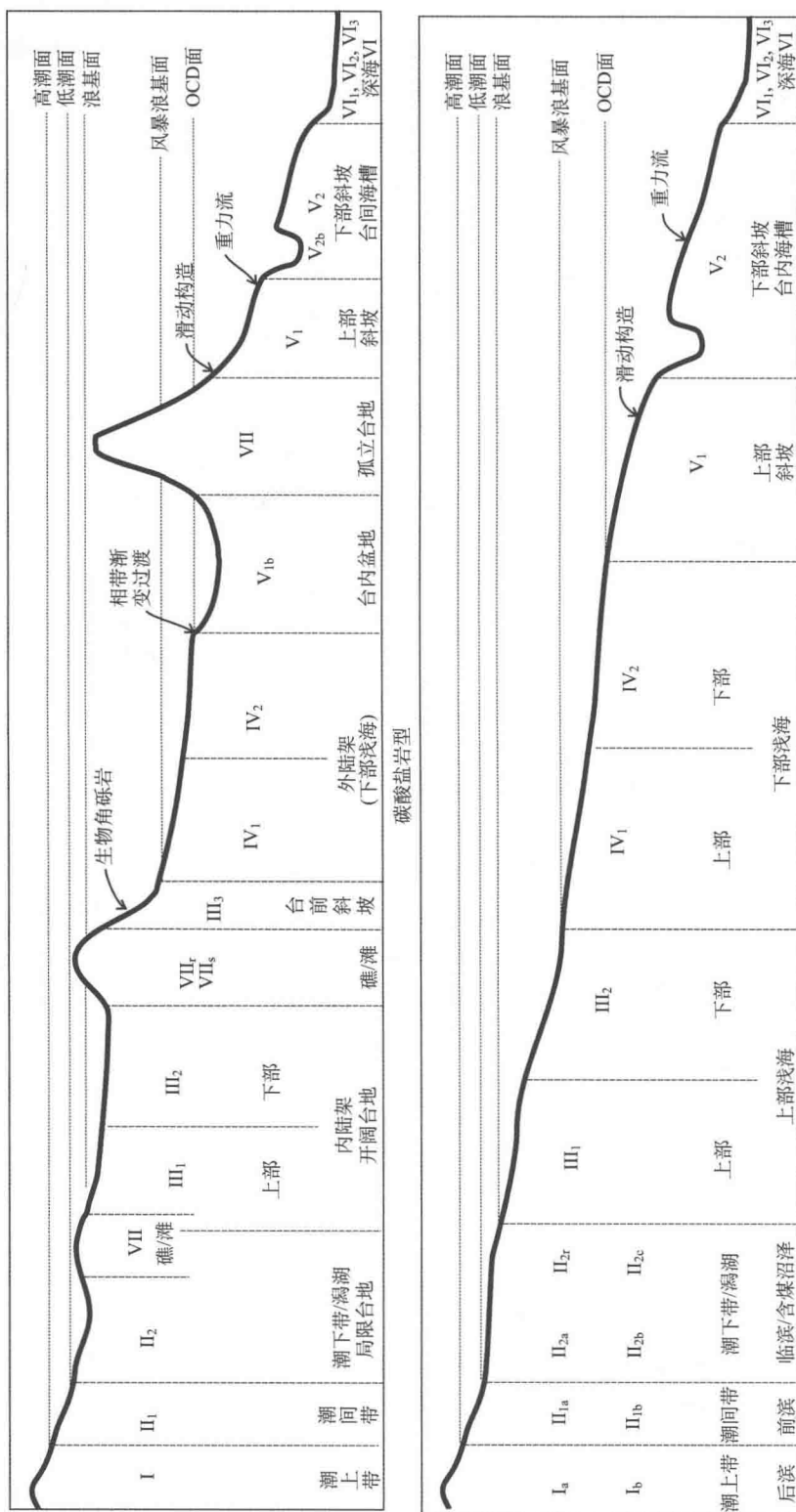
为了比较可靠地反映生产力, 可以采用多种方法互相校验。下面简单介绍评估初级生产力或初级有机碳的方法。

1. 生境型方法

生境型 (habitat type) 是指群落生存环境条件的总和。同一生境 (生存环境) 型在时空上可重复再现, 其生产力可以对比。

(1) 生境型划分方案

最早的古生境型分类可能是“底栖组合 1~5” (Ziegler, 1965)。殷鸿福等 (1995) 将生境型与沉积结合起来, 提出了华南二叠系—三叠系古群落的 7 种生境型, 19 种亚型。本书据此而针对华南提出的补充分类建议亦强调古群落与沉积体系的紧密关系 (图 1.2), 因为群落的生物多样性、总丰度、尸积群与埋藏群 (无论原地或异地组合) 均与沉积体系有关。所建议的生境型 (HT I~VII) 及亚型有从潮上带到深海、超深海的各



位置而划分的。进一步的划分则基于底质成分（泥质、碳酸盐质）、氧化还原及水流条件。生境型 I~VII 的生物特点详见殷鸿福等（1995）的研究。

海洋古生境型（HT）划分方案如下：

I 潮上带（supratidal，后滨 backshore）生境型

I_a 潮上带

I_b 后滨

II 潮间带及潮下带生境型。滨海地区地貌及水动力条件比较复杂，分开比较好，避免出现同一生境型生产力等指标差得很远

II₁, II_{1a} 潮间带（intertidal）（低能）生境型，相当于 BA（底栖组合）1+2

II_{1b} 前滨带（foreshore）（高能）生境型，相当于 BA1+2

II₂, II_{2a} 潮下带（subtidal）（低能）生境型，范围为低潮线（0m）至正常浪基面（大致 5~10m），相当于 BA2 或 BA3 的一部分

II_{2b} 临滨带（滨面）（shoreface）（高能）生境型，范围为低潮线（0m）至正常浪基面（大致 5~10m），相当于 BA2 或 BA3 的一部分

II_{2r} 局限台地（restricted platform），主要为潟湖相，水深有时可达 III₁

II_{2c} 含煤沼泽（coal swamp）

III 上部浅海（upper neritic）生境型：范围大致相当于上部远滨（upper offshore），或内陆架（inner shelf），或正常浪基面至风暴浪基面之间。底栖组合相当于 BA3

III₁ 上部浅海上部（大致 10~30m）生境型

III₂ 上部浅海下部（大致 30~50m 或 60m）生境型

IV 下部浅海（lower neritic）生境型：范围大致相当于下部远滨（lower offshore）或外陆架（outer shelf），或风暴浪基面至自由氧补偿界面（OCD）之间，约 50m 或 60~200m，底栖组合相当 BA4~BA5

IV₁ 下部浅海上部（大致 50m 或 60~100m）生境型，相当于 BA4

IV₂ 下部浅海下部（大致 100~200m）生境型，相当于 BA5

V 半深海（bathyal）生境型：范围大致相当于大陆坡（continental slope）

V₁ 上部斜坡（upper slope）生境型（大致 200~1000m）

V_{1b} 台内盆地（intra-shelf basin）生境型

V₂ 下部斜坡（lower slope）生境型（大致 1000~3000m）

V_{2b} 台间海槽（inter-shelf basin）生境型

VI 深海（abyssal）生境型

VI₁ 上部深海（upper abyssal）生境型（大致 3000~4500m）

VI₂ 下部深海（lower abyssal）生境型（大致 4500~6000m）

VI₃ 超深海（hadal）生境型（大于 6000m），均为碎屑相

VII 生物礁/滩生境型（均为碳酸盐岩）

VII_r 台地边缘生物礁

VII_s 生物碎屑滩

(2) 生境型方法计算初级生产力的原则

由于同一生境型在时空上可重复再现, 根据将今论古原理, 古代某一生境型的生产力, 可以套用与现代相对应生境型的生产力。在此基础上, 要根据条件变化(温度、纬度、底质、氧化还原条件等)作修正, 因此, 这种方法可以大致估算出地质历史时期某一环境初级古生产力的大致变化范围。中国乃至世界海区不同生境型的初级生产力(PP)分布已有很多资料可供广泛对比。详见第四章第一节的现代海洋生产力变化特征。

2. 地球微生物学方法

地球微生物学可以有多种方法评估古生产力, 既可以从第一营养级的微生物直接估算初级古生产力, 也可以利用放射虫等第二营养级生物的丰度估算初级古生产力。下面着重介绍 Gu 等(2007)报道的从第二营养级生物——放射虫的丰度估算初级古生产力。

放射虫类为一类微型—小型的浮游动物, 依靠捕食浮游生物为生。它在食物链中处于第二营养级。第二营养级(放射虫)的产量=初级消费者的生产量=初级生产量×生态效率。只要知道放射虫的生产力, 通过此法可以大致推测初级生产力。

估算放射虫古生产力的步骤方法如下:

1) 通过统计一定厚度和面积的岩石中放射虫个体数, 来估算放射虫的密度(个/cm²)。首先, 样品被定向, 切割为长方体, 记录其底面积(BA)和厚度(T)。然后用一般处理放射虫的方法将其全部处理, 挑出其中的放射虫, 统计其中全部放射虫的数量, 包括碎片(NR)。

2) 获得沉积速率(RS)。通过磁化率地层学、高分辨率地层学的方法, 求出岩石的沉积速率(cm/a)。

3) 根据1)和2)的结果, 获得岩石中放射虫的累计沉积速率[RA, 个/(m²·a)]。即

$$RA = (RS \times NR) / (BA \times T) \quad (1.1)$$

4) 估算放射虫的保存比例。在沉降到海底之前。约有1%~10% (平均3%~5%)的生物硅最终能沉降到海底(De Wever *et al.*, 2001), 有的计算表明约3%的壳体能够沉降到海底。

沉降到海底的放射虫经过成岩作用后得以最终保存下来。沉积速率对沉降到海底的放射虫壳的最终保存有影响。速率越高, 则保存率越高。如果沉积速率为250cm/ka, 则最多有86%的壳体被保存。如果沉积速率为1~3cm/ka, 则仅有1%~5%的壳体被保存(DeMaster *et al.*, 1996)。

5) 计算放射虫的产率PR。

$$PR = RA / RP = (RS \times NR) / (BA \times T \times RP) \quad (1.2)$$

式中, RA 为放射虫的累积沉积速率, RP 为放射虫的保存比例。