

8811

石油形成和分布

油气勘探新途径

[法]B.P. 蒂索 [西德]D.H. 威尔特著

郝石生等译



200556380



00330589



2155/32

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是作者在长期从事石油性质、起源和分布的学术研究及实际调查的基础上，撰写的科学专著。作者主要从有机地球化学出发，论述了生油母质——干酪根转变为石油和天然气的机理，以及油气运移与聚集的规律，生油层的鉴别、估价、对比，同时也介绍了煤和油页岩形成的重要机理等。

可供石油地质、有机地球化学和油田地质技术人员、有关科学研究人员以及院校师生参考。

B.P. Tissot D.H. Welte

Petroleum Formation and Occurrence

A New Approach to Oil and Gas Exploration

Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1978

石 油 形 成 和 分 布

油气勘探新途径

(法)B.P. 蒂索 (西德)D.H. 威尔特著

郝石生等译

石油工业出版社出版

(北京安定门内大街后街甲36号)

大厂回族自治县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 1/16开本 23¹/₄印张 579千字 印1—3,200

1982年4月北京第1版 1982年4月北京第1次印刷

书号: 15037·2257 定价: 2.45元

译 者 的 话

本书系由 B.P. 蒂索和 D.H. 威尔特合著。两位学者于1978年先后访问了我国，与我们举行了多次学术座谈和讨论，并赠予刚刚出版的此书。

该书内容比较丰富，除搜集了大量前人的有机地球化学等方面的研究成果外，作者们长期所从事的有关科研成果也反映在本书上。它具有较高的学术水平，同时某些见解也颇有独到之处。为此，我们将全书译出，供从事石油地质和有机地球化学工作者以及其他有关的地质、煤炭技术人员参考。

本书共分五部分。第一部分第四章赵铁龄同志译（并担任第二部分第三、四章的校订）、第二部分第五章（除5.1节外）至第八章陆婉珍、李晋超同志译、第三部分甘克文同志译、第四部分范从武同志译，其余部分皆由郝石生同志译。全书的统校及定稿工作亦由郝石生同志担任，甘克文同志协助。杨义同志在本书翻译过程中，给予了很多协助，在此致以谢意。

译文不妥之处，恳请读者指正。

1979年10月

前 言

《石油形成和分布》一书的出版，主要目的是认真地进行交流。这本书在不同学科领域皆有它的基础，像生物学、海洋学，而最重要的是化学和地质学的各种分科。涉及到科学工作或具研究性质的工业工作，或者是与石油有关的实际问题，长期来都已确认了这个事实。在这些方面人员的稳定地增加也是为了寻找石油勘探各方面的综合性资料来源。

一些年来，我们曾在不同的国家内举办过有关石油成因、运移和聚集的研究班。在这些学习班内产生了写一本书的想法。这个情况经讨论以后，明确了这样的一本书不应由很多各专门领域内的专家来写，既使有很大的工作量，但也应由我们两个主要负责人来写。这样，我们期望这本书将易于阅读，同时也期望这个主题很多困难的问题能够更好的被理解。

我们希望科学界的人士和地学、化学或其他科学分科的高年级学生能从此书中有所收获。和目前的情况相比较，这本书亦可有助于把有机地球化学与地学更好的合并成为一科学的整体。但最主要的，我们希望这本书系用于石油勘探这方面的工作以及与其有关的领域。长期以来，地质学家从事于实际的勘探工作，研究人员较多的涉及到化学方面的实验室工作，二者是缺乏联系的；我们希望联通这个空隙。

通过我们的这本书，我们想说明，从石油生成和运移原理的汇总和应用中，石油调查工作能够得到很大的益处。多年来，确定钻探一口井很大程度是根据对适宜构造的确认。而构造的选择主要是根据直接感觉和一般的经验，因为有关圈闭内是否含油气的资料是很少的。若是象这本书所介绍的，系统地运用石油生成和分布方面新的综合性认识，就能提高预期含油气构造的成功率，并因而减少了钻探投资的冒险性。根据这个看法的需要，未来的石油地质学家们必须具有一些石油地球化学的知识。所以，有机地球化学的教学工作是应该发展的。我们希望，这本书能作为石油地球化学（包括在有机地球化学课程内）的一个基本内容。

本书的完成如果没有我们的共同作者、同事及朋友们的帮助是不可能的，尤其是律埃—玛勒麦宗法国石油研究院（IFP）、于律希岩心研究设备有限公司（KFA）和亚亨市莱茵—威斯特发里亚高等学校（RWTH）的同事们。我们非常的感激 P. 阿布雷契特、Ch. 科恩弗特、W. 都、B. 杜伦德、G. 埃格林顿、A. 胡德、R. 佩里特、J. 威廉姆斯和 M.A. 育克里尔，他们认真的阅读和评论了部分的手稿。我们也感谢 R. 迪戴利兹女士，她在最后稿件编制的准备过程中，不知疲倦地帮助工作。我们更需要感谢我们的夫人，在编写此书时她们对我们的支持。

最后，尤其要感谢 H.D. 赫德勃格，他阅读了所有的内容，并提出了很有价值的意见，并在整个工作过程中给予我们鼓励。

B.P. 蒂索

D.H. 威尔特

1978年4月

序 言

蒂索和威尔特合著《石油形成和分布》一书的出版，肯定为石油地质学家、石油地球化学学家以及该学科领域的师生和其他对自然界中烃类起源和聚集感兴趣的人们所欢迎。我们能分享这两位杰出科学家、长期集中从事石油性质、起源和分布的学术研究与实际调查中所获得和发展的、有价值的科学报告是幸运的。

B·P·蒂索教授1954年毕业于国立高等矿业学校，1955年毕业于国立高等石油学校，同年，获格勒诺布尔大学地质学博士学位，然后开始在法国石油研究院进行研究工作。1965年任地球化学部主任，从1970年开始又在国立高等石油学校讲授有机地球化学课，并于1973年任教授。蒂索教授具有渊博和多方面的实际经验。他曾是法国新喀里多尼亚以及撒哈拉勘探队的成员。1960~1963年，他领导并完成了法国石油研究院承担澳大利亚国家发展部所给予的任务。他最出色的成就是以巴黎盆地为“实验室”发展了温度与石油成因关系的理论。近年来，他以很大的精力致力于北美地区并发表了阿萨巴斯卡沥青砂岩和犹英塔盆地石油成因的论文。他与J·埃斯皮塔利埃共同负责发展了新的热解技术、鉴别生油岩及其成熟阶段方面仪器的使用以及沉积岩中有机物质热演化的模型。他是在英文和法文书刊上发表很多有关石油成因和运移的著名科学论文的作者或作者之一。

D·H·威尔特教授，1959年获维尔茨堡大学地质学和化学博士学位。此后，他作为一个地球化学研究家在海牙的壳牌国际石油公司从事了三年石油与天然气起源方面的研究工作。1963年，他回到维尔茨堡，在这里他建立了一个有机地球化学的研究实验室。1966年，由于他的著名论文“石油和生油岩的对比”而获得美国石油地质家协会的主席奖。在1966年，他访问了美国的各个学术的和工业的实验室，并于1967年取得高级地球化学研究家的位置，直到离开美国以前，他与谢夫隆油田研究公司在勘探方面的合作起了很大作用。在他与谢夫隆油田研究公司合作期间，在对加利福尼亚、海湾海岸区和美国其他地区的地质-地球化学研究计划方面进行了工作。1970~1972年，他任教于哥廷根大学，从1972年，他是亚琛技术学院的地质、地球化学和石油及煤矿床学的教授。在他的科学历程中，威尔特教授著有很多有名的石油地球化学著作，刊载在德文或英文的各种杂志及书上；此外，还有很多来源于与其有关石油公司的私人报告。最近，威尔特教授虽然继续在亚琛技术学院担任一些教学工作外，并担任了在朱利奥核子研究中心新成立的石油和有机地球化学研究院院长的职务。

蒂索教授和威尔特教授虽然居住于欧洲并且目前在欧洲学术机构工作，但他们时常旅居美国，并长时期地参加美国地球化学家和地质学家的会议活动。他们二位对于美国石油生成问题作了大量的工作，并在美国石油地质家协会会志上发表了多篇论文。很多读者可回忆起1973年5月在阿尔伯达省班夫召开的沉积岩流体地质和有机物质的著名会议上，作者用了一些时日在主题范围和学术问题提出了专门的题目并对石油地质学家的代表们作了说明。蒂索和威尔特都参加了乔伊迪斯深海钻探计划中岩心的油气研究工作，并对此工作给予了很大的帮助；同时也是有机地球化学乔伊迪斯小组的成员。

回溯到十七世纪，当很多与神秘的“燃素”^①说有关的设想被提出时，石油成因的问题就已对科学家提出了挑战。随着石油工业的发展，这个单纯是科学好奇的问题已经成为一个重要实践的主题，对石油成因的认识时常意味着石油勘探的成败与否。由于地质学家、地球化学家和地球物理学家的共同努力，石油勘探取得很大进展，但主要问题仍是具有很多令人疑惑的未知数和水动力学中某些不明确的问题。目前，或许具有更多不明确的和未知数是石油运移和聚集的条件，而它们在实际的石油勘探中是很重要的。蒂索和威尔特不仅作为地球化学家——石油基本原料的储存开始的。然后就是很重要的第二部分，有关这些有机物质转化为干酪根，然后再转化为石油和天然气的问题。同时也论述了煤和油页岩形成的重要机理。第三部分涉及到油气藏的形成以及石油从生油层运移到储集层的令人费解的问题。第四部分则涉及到石油的组分和分类，“地球化学化石”和石油特性与地质环境、石油在储集层中后期变化的关系。第五部分包括了生油岩的实际鉴别和估价、石油与石油以及石油与生油岩的对比和石油勘探中有机地球化学实际应用的估价等。

蒂索和威尔特的这部著作，是两位世界上在石油成因、运移和聚集方面处于领先地位的科学研究者从地球化学观点出发的专著，本书条理清晰、有实际应用价值，文笔流畅易读也适合于地质学观点。通过有价值的图表而使全书更加清晰，同时也是一本参考资料的宝库，在全面归纳了其他的、甚至有时是不同的观点下，以具有逻辑的和合理的形式列出了标题。蒂索—威尔特这本书的许多优点之一是它广开思路的论述问题而无教条的态度——对主题真正深奥的概念真正的反映。本书尤其着重介绍了近代石油地球化学研究中的实际方法和所需的复杂仪器，同时也探讨与这方面有关的理论性的问题。

本书作为高等学校教材和该专业的指导书和参考书都将占有很重要的地位，所有参加实践的石油地质学家和地球化学家们都应人手一册。毫无疑问，优秀的石油勘探者仍是应读此书的。

霍利斯 D·赫德勃格
普林斯顿大学
地质系教授(名誉)

① 燃素是以前人们相信可燃物中所存在的一种东西。——译者

目 录

第一部分 从地质观点剖视有机物质的产生和聚集

第一章 有机物质的产生和聚集及有机碳的循环.....	1
1.1 光合作用——大量有机物质产生的基础.....	1
1.2 地球历史时期有机碳的概算.....	3
1.3 黑海中有有机碳的估算.....	6
概要和结论.....	8
第二章 生物圈的演化.....	9
2.1 浮游植物和细菌.....	9
2.2 高等植物.....	11
2.3 生物圈的地质历史.....	12
概要和结论.....	13
第三章 近代水体环境的生物产率.....	14
3.1 有机物质的原始产率.....	14
3.2 影响原始产率的因素.....	15
3.3 海洋目前的原始产量.....	19
概要和结论.....	20
第四章 生命物体的化学组成: 细菌、浮游植物、浮游动物、高等植物.....	21
4.1 蛋白质和碳水化合物.....	21
4.2 类脂.....	21
4.3 木质素和丹宁.....	29
4.4 定性和定量地出现在细菌、浮游植物、浮游动物和高等植物中重要的化学组分.....	31
4.5 天然组合及其对生命物体组成的影响.....	34
概要和结论.....	37
第五章 沉积作用及有机物质的聚集.....	
5.1 富含有机物质的化石和现代沉积物及其地质意义.....	38
5.2 溶解的作用及微粒有机物质.....	39
5.3 沉积有机物质的聚集机理.....	41

概要和结论.....	42
参考文献.....	43

第二部分 沉积盆地中有机物质演化的结果: 石油和天然气的生成

第一章 有机物质的成岩作用、退化作用和交替作用.....	47
1.1 成岩作用.....	47
1.2 退化作用.....	49
1.3 交替作用和变质作用.....	49
概要和结论.....	49
第二章 有机物质的早期转变作用: 从生物到地球化学化石和干酪根的成岩作用途径.....	51
2.1 早期转变作用的意义和主要阶段.....	51
2.2 生物降解作用.....	51
2.3 缩聚作用.....	56
2.4 非溶解作用.....	58
2.5 年青沉积物中有机物质的同位素组分.....	61
2.6 成岩作用的结果和平衡.....	61
概要和结论.....	62
第三章 石油生成的地球化学化石及其意义.....	64
3.1 成岩作用——退化作用: 地下烃类的两种不同来源.....	64
3.2 直接或通过早期的成岩作用: 从活有机物中继承得到的烃类: 地球化学化石.....	68
3.3 正构烷.....	69
3.4 异-和反异-构烷.....	75
3.5 C ₁₀ -支链烷.....	75
3.6 无环的异戊间二烯化合物.....	77
3.7 三环双萜烯化合物.....	79
3.8 出现在近代和古代沉积物中的	

甾烷化合物和五环三萜烯化合物	80
3.9 成岩作用过程中甾烷化合物和三萜烯化合物的转化	82
3.10 多萜烯	83
3.11 芳香族化合物	84
3.12 含氧和氮的化合物	84
3.13 作为化石分子可能来源的干酪根	85
概要和结论	86
第四章 干酪根：成分和分类	87
4.1 干酪根的定义和重要性	87
4.2 干酪根的分选	88
4.3 显微镜下干酪根的组分	88
4.4 确定干酪根结构的化学和物理方法	91
4.5 化学分析	92
4.6 物理分析	92
4.7 干酪根的一般结构	96
4.8 干酪根的沉积环境和组分：演化的途径	98
4.9 结论	102
概要和结论	102
第五章 从干酪根到石油	104
5.1 干酪根的成岩作用、退化作用和交替作用	104
5.2 干酪根演化的试验室模拟	110
5.3 干酪根的结构演化	114
5.4 退化过程中碳氢化合物的形成	115
5.5 碳同位素分馏和干酪根的演变	124
5.6 从有机物质中用试验法产生烃类	125
概要和结论	128
第六章 石油生成与地质过程的关系。	
油气生成的时间	129
6.1 石油生成的一般过程	129
6.2 气体的生成	131
6.3 生油潜力和转化率	132
6.4 有机物质的性质 气区和油区	133
6.5 温度、时间和压力	134
6.6 油气生成的时间	136
6.7 生油岩沉积时间和石油生成时间的比较	137
概要和结论	139

第七章 煤及其与油气的关系	140
7.1 煤生成的综述	140
7.2 泥煤的形成	140
7.3 成煤过程	143
7.4 煤岩学	148
7.5 石油的生成	149
概要和结论	154
第八章 油页岩：一种具有潜在经济价值的、富含干酪根的沉积物	155
8.1 历史	155
8.2 油页岩的定义 油页岩与生油岩的异同	155
8.3 有机物质的组成	156
8.4 沉积条件	157
8.5 油页岩的密度	158
8.6 油页岩的热解	158
8.7 石油的产率：页岩油的组成	159
8.8 油页岩的分布和储量	159
概要和结论	163
参考文献	164

第三部分 油气的运移和聚集

第一章 油气运移和聚集的引言	181
概要和结论	182
第二章 初次运移的物理化学状态	183
2.1 温度和压力	183
2.2 压实作用	186
2.3 流体	189
2.4 初次运移的可能模式	191
概要和结论	198
第三章 初次运移的地质和地球化学	199
3.1 初次运移的时间和深度	199
3.2 生油岩的沥青和原油的成分变化	202
3.3 初次运移的地质和地球化学估价	202
3.4 初次运移的初步结论和设想	203
概要和结论	206
第四章 二次运移和聚集	207
4.1 油气的浮升和毛细管压力	207
4.2 水动力学和二次运移	209
4.3 二次运移的地质和	

地球化学含义	210
4.4 二次运移的结束和油气聚集	213
4.5 二次运移的距离	215
概要和结论	216
第五章 储集岩、圈闭和油气藏位置	217
5.1 储集岩	217
5.2 圈闭	219
概要和结论	221
参考文献	223
第四部分 原油的组成和分类以及地质因素的影响	
第一章 原油组分	229
1.1 石油与生油岩沥青的比较	229
1.2 确定原油特性的分析程序	229
1.3 原油中各种成分的主要组分	231
1.4 原油中烃类的主要类型	234
1.5 硫的化合物	243
1.6 氮的化合物	247
1.7 氧的化合物	248
1.8 高分子量的氮、硫、氧化合物	248
1.9 有机金属化合物	250
1.10 主要原油组分的协变性分析	250
概要和结论	253
第二章 原油的分类	254
2.1 概述	254
2.2 历史	254
2.3 原油分类法提出的根据	255
2.4 原油的分类	255
2.5 主要原油类型的特征	257
2.6 小结	258
概要和结论	259
第三章 作为地质历史和沉积环境指标的沉积物和原油中的地球化学化石	261
3.1 化石分子的意义	261
3.2 作为地质环境指标的地球化学化石	262
3.3 作为成岩作用指标的地球化学化石	266
3.4 作为退化作用指标的地球化学化石	267
3.5 地球化学化石应用的现状和进一步的发展	268

概要和结论	267
第四章 石油类型的地质控制条件	270
4.1 原油组成的一般规律和地球化学规律	270
4.2 与沉积环境有关的地球化学规律	270
4.3 关于热力演化的地球化学规律	277
4.4 原油规律性的小结	282
概要和结论	282
第五章 石油的更替作用	283
5.1 热力更替作用	283
5.2 脱沥青作用	284
5.3 生物降解作用和水洗作用	286
概要和结论	289
参考文献	290
第五部分 油气勘探的一种新途径：石油生成和运移原理的应用	
第一章 生油岩的鉴定	296
1.1 有机物质的数量	296
1.2 有机物质的类型	297
1.3 有机物质的成熟作用	308
1.4 表示具潜力生油岩特征的结论	318
概要和结论	323
第二章 石油和生油岩的对比	324
2.1 对比参数	325
2.2 石油-石油对比的实例	326
2.3 石油-生油岩对比实例	330
概要和结论	333
第三章 确定石油远景：石油生成和运移原理的应用	334
3.1 盆地内石油生成的初期概念模型	334
3.2 探井有机地球化学资料的最优化	335
3.3 盆地中最有利石油聚集带的确定：确定远景的一种地球化学途径	336
概要和结论	347
第四章 数学模型：对石油和天然气远景评价的一种定量途径	343
4.1 对沉积盆地石油潜力定量方法的	

必要性.....	343	4.7 热流和地温梯度.....	351
4.2 干酪根降解和烃类生成的 数学模型.....	343	4.8 古代地温梯度重构的一般法则.....	352
4.3 生油岩的生油气潜力、转化率.....	346	4.9 目前地温梯度的估算.....	354
4.4 模型的有效性.....	347	4.10 古代地温梯度的估算.....	354
4.5 与有机物质类型有关的活 化能的意义.....	347	4.11 结论.....	356
4.6 数学模拟在石油勘探中的应用.....	348	概要和结论.....	356
		参考文献.....	357

第一部分 从地质观点剖视有机物质的产生和聚集

第一章 有机物质的产生和聚集及有机碳的循环

未降解有机物质的产生、聚集和保存是油源岩存在的先决条件。本书所用的“有机物质”或“有机材料”等术语，仅指直接或间接来源于生物有机部分。在单体或复体形式下，由有机分子所组成的物质。这包括像贝壳、骨头和牙齿等矿物骨骼部分。首先，有机物质应是较活的生物所合成的，因而它必须是沉积和保存在沉积物之中。在悠久的地质过程中，部分沉积的有机物质可以被转化成为类石油的化合物。重要的是人们应体会到，在地壳发展的历史过程中，有机物质的合成、沉积和保存的条件变化很大。

1.1 光合作用——大量有机物质产生的基础

作为全球性现象所出现的光合作用是与其潜在生油岩的形成有关的、值得注意的历史性情况。光合作用的过程是把光能转变为化学能。光合作用基本上是水中的氢与二氧化碳的转化，以产生葡萄糖和氧形式的有机物质。氧是从水分子中，而不是从二氧化碳中游离出来的。自养生物从葡萄糖中能够合成多糖类，如纤维素和淀粉以及所有其它所需的物质。图1.1.1所示。为一个简单的光合作用反应方程式。

光合作用是地壳上造成有机物质大量产生的基本过程。象光合的细菌和蓝-绿藻等原始的自养有机物是形成这种大量产物的重要有机物。光合作用最基本的先决条件是吸收光的绿色色素的叶绿素（图1.1.2）。在原始自养有机物中，叶绿素以比较游离的状态存在于有机物的细胞中。在进化较高级的植物中，叶绿素集中在绿色树叶的叶绿体中。这些叶绿体是完成光合作用的“工厂”。

最古老有机生命的记载大约是31至33亿年，系从南非斯瓦齐兰德群中获得了细菌和似藻体（Schopf et al, 1965）。然而，可能地壳上的生命至少与最老的已知岩石一样，为37亿年。

可以推断在近20亿年以前，有机物质光合作用的产物已明显地遍及全世界，而这个时候可作为零的基准点。在达到该点以前，另外的10亿年可能是由最原始有机物的孤立存在到尽量扩大其光合作用，以便有机物质的大量产生。

图1.1.3说明了有机碳的循环过程中，概括地说明地质情况是重要的。没有水就没有生命。

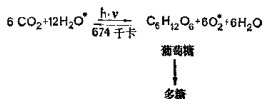


图1.1.1 光合作用方程式。借助于阳光（ $h\nu$ ）由绿色植物形成相当多能量的葡萄糖。氧是这个过程的副产品

用。由细菌所进行的古老光合作用形成并不能产生氧，因光合的细菌是厌氧的。水可作为氢的来源，细菌只能利用 H_2S 分泌出硫而不能分泌出氧。

某些从光合细菌演化出的蓝-绿藻可能是第一个产氧的生物。虽然有许多光合的色素，但并不能完全代替光合生物的叶绿素（图 1.1.2）。叶绿素分子吸收光的能量转变为电子，以形成高的能量。这种所增加的能量则被输送到其它的分子中。

氧在那个时候被认为对生物是有毒的。但是可以肯定，在还原环境的水体溶液中有丰富的二价铁。这种铁和光合作用的副产品一样，可作为产生氧的原因。前寒武纪众所周知的条带状的铁质岩，很可能是由于光和作用和后来铁被氧化为三价铁，与不溶氧化物沉淀的相互作用而形成（Cloud, 1968）。

自养的、行光合作用的有机物超过了异养的有机物，并且不久就在生物界中占了优势。如前所述，大约在20亿年以前，光合作用作为一种全球性的现象而出现。因此，对于食料的供给和高等生命形式的演化都奠定了基础。可以认为，这种情况发生后，地球的大气圈慢慢变成氧化环境，即出现了游离的分子氧。

光合作用利用来自日光的能量，但仅利用日光全部辐射的一种窄的光束。大部分行光合作用生物所利用光谱部分是4000~8000 Å，这大致相当于人类肉眼可见光的部分。波长短和高能量的光线甚至对生命是有害的。可见光光谱的不同部分可被行光合作用的不同生物所利用。所用的部分要靠某种生物体所具有的色素类型来决定（图 1.1.4）。它能使行光合作用的藻类和细菌在同一水体的不同深度内生活。深水中的生物与其所利用的光波波长有关。

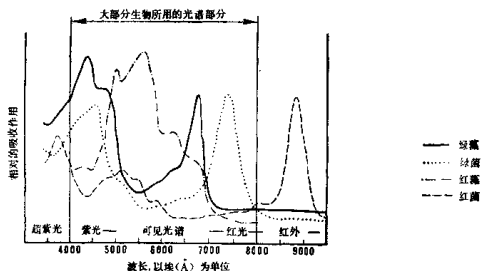


图 1.1.4 光谱的不同部分可以被不同行光合作用的生物所利用。这能使行光合作用的藻类和细菌在同一水体的不同深度内生活。（根据Tappan和Loeblich资料修改, 1970）

1.2 地球历史时期有机碳的概算

在地球历史时期，由于用于光合作用的碳的质量平衡，故应计算出现在地球上各种储存场所（如海水和沉积物）所有有机碳的总和。有机碳和石墨总的估算量（在形式表现为沉积的有机碳）大约是 6.4×10^{15} 吨（Welte, 1970）。最近亨特估算约为这个数字的两倍。在亨特的平衡计算中包括了玄武岩和其他火山岩中的“有机”碳，以及花岗岩和所有变质岩中的“有机”碳。而这么多起源于生物的“有机”碳是值得怀疑的。

地球上大部分有机碳集中在地壳的沉积岩中。一部分为固定有机碳，大部分为碳酸盐的

碳。估计沉积岩中碳总量的18%为有机碳,而沉积碳的82%被结合在碳酸盐的形式中(Schidlowski et al, 1974)。

当然,有机碳和碳酸盐碳之间是有联系的。大气圈所储存的 CO_2 不断的与水圈储存的 CO 相交换。从水体环境中,通过生物(介壳、骨骼等)可使碳酸盐沉淀或沉积下来以形成碳酸盐沉积物。反过来,碳酸盐岩可以被溶解以完成水体中 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 和 CO_2 之间的平衡反应。原始的有机物质可通过陆地植物从大气圈中所储存的 CO_2 而直接形成;或通过海洋植物的光合作用从水圈溶解的 CO_2 而直接形成。而陆地和海洋植物的本身由于氧化作用而受到很大的破坏。所以,在这个系统中, CO_2 是反复的循环作用。图 1.1.5 的简明略图显示了地壳内与元素碳有关的主要过程和途径。包括水圈的地壳内,几乎可以忽略的有机碳部分是活的生物中和呈溶解状态的有机碳,有机碳的大部分是固定在沉积物中 (5.0×10^{15} 吨) 有机碳另外相当大的一部分 (1.4×10^{15} 吨), 主要是以石墨状物质的形式或变质无烟煤形式固定在沉积成因的变质岩中(表 1.1.1)。

如果认为在地球的历史过程中,所有的这些有机碳是由光合作用直接或间接形成的;那么,根据光合作用方程式,同时也应释放出相应数量的氧(图 1.1.1)。氧的数量必须用游离氧以及以前的物质(生物的有机物质除外)氧化过程所用的游离氧来算出。目前,我们得到了大气圈中的游离氧含量(空气中为体积的 20.95%)和溶解在海洋水体中不同数量的 O_2 (每升为 2~8 毫升)。以前的游离氧可从死亡的和活着的有机物质中确定。然而,大多数游离氧已被硫和铁的不同形式氧化作用所利用。这种氧目前已与硫结合并成为三价铁的氧化物,并普遍分布在包括水圈在内的地壳中(表 1.1.2)。

如前所述,可以相信地球的原始大气圈是还原状态的,而元素硫和铁仅以二价形式出现。因而,由光合作用产生的氧一般是含氧的硫化物到硫酸盐以及二价到三价的铁。地球上发现的游离氧和以前游离氧的总量大约为 16.9×10^{15} 吨。

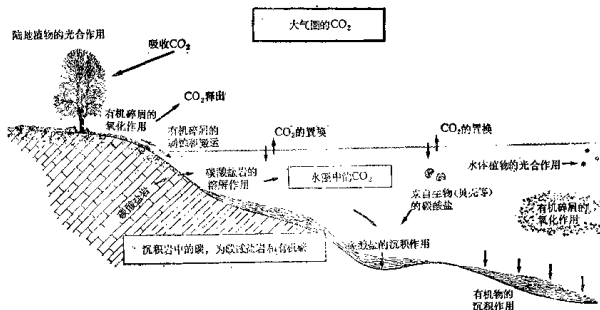


图 1.1.5 涉及到元素碳的主要过程和途径。地球上大多数碳集中在沉积岩中, 大约 18%是有机的, 约82%是碳酸盐结晶。生物产生的大多数有机碳很快的被氧化成 CO_2 并且与大气圈和水圈储有的 CO_2 再循环

表 1.1 地壳中的有机碳 (单位为 10^{15} 吨, 根据 Welte, 1970)

有机物和降解的有机碳	0.003
沉积物	5.0
沉积成因的变质岩 (占所有变质岩的80%)	1.4
总的有机碳	6.4

表 1.2 地壳内游离的和以前的游离氧,
单位为 10^{15} 吨, 不包括碳酸盐岩和硅酸盐类的氧 (根据 Welte, 1970)

大气圈	0.18
海洋	0.02
生物的 CO_2	0.18
溶解在海洋中的 SO_4^{2-}	2.6
蒸发岩的 SO_4^{2-}	10.2
$\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$	2.7
总 氧	16.9

由氧 (16.9×10^{15} 吨) 和有机碳 (6.4×10^{15} 吨) 所计算的总量比例与 CO_2 分子中的质量比例是相似的:

$$\left(\frac{\text{O}_2}{\text{C}} = \frac{32}{12} = 2.66 \right)$$

$$\left(\frac{\text{以前的游离氧} \times 10^{15} \text{ 吨}}{\text{岩石中的有机碳} \times 10^{15} \text{ 吨}} = \frac{16.9}{6.4} = 2.64 \right)$$

以光合作用为基础的这种氧和有机碳的平衡计算表明, 大多数不结合在碳酸盐和硅酸盐中氧确系由光合作用而产生。所以, 古代沉积物中的有机碳是和古大气圈中的含氧量有关的。

根据加雷尔斯和麦肯齐 (Garrels and Mackenzie, 1969) 提出的使用所谓的沉积岩的半质量期 (half-mass age) 以及前面所阐述的数字, 计算出有机碳的聚集率大约为 3.2×10^4 吨/年。现在每年海水的有机碳产量估计是 6×10^{10} 吨 (Valentyn, 1965)。根据每年海水产量, 在地球的发展历史期间, 计算出全球总的有机碳保存率是 10^{-4} 或 0.01%。虽然, 确切的保存率是难以估计的, 但假定其小于 0.1% 似乎还是比较可靠的。门泽勒和赖塞 (Menzel and Ryther, 1970) 也估计有机碳年产量的 0.1% 系埋藏在地下的沉积物中。只有这很小部分的有机物质被保存在沉积物中, 而其余部分则进行再循环, 主要是在海洋水层上部的光亮带内进行。这就是海洋学家所说的, 与海洋中活的浮游植物和 CO_2 有关的紧密相联的体系。在对黑海的有机物质的成因和归宿的研究中, 杜斯尔 (Deuser, 1971) 发现其保存率为 4%。但是 4% 的值应认为是一个上限, 只有像黑海这样有利的条件下才能达到。这种条件是缺氧和水体极平静, 除厌氧细菌外, 没有吃腐肉的底栖生命。某些油源岩的沉积很可能发生在相似的条件下。

在这个问题上, 有利于有机物质产生和保存的条件是时常改变的, 在这种情况下, 有机物质就不会保存在沉积物中。一个明显实例是罗斯和德根斯 (Ross and Degens, 1974) 所描述黑海中的年青物, 该沉积物为一系列细粒的纹层沉积物, 具有富含有机碳和缺少有机碳的互变层。

图1.1.6所示为自然界中有机碳的循环。有一个初期的、具有约 $2.7 \sim 3.0 \times 10^{12}$ 吨有机碳参与的小循环，其半衰期为几天到几十年。也有一个二次的、估计由 6.4×10^{18} 吨有机碳组成的大循环，并具有几百万年的半衰期。这两个循环由相当于总有机碳的0.01~0.1%的、代表了沉积有机物质氧化成 CO_2 的少量物质而相互联接。我们认为，大型的二次循环是非常重要的。一旦有机物质进入了沉积物，它们的命运就主要受构造发展情况的控制。换言之，沉降和埋藏作用的增加，或者是上升和剥蚀作用的发生，决定了沉积物中有机含量是否被保存起来并转化为石油，还是被剥蚀和氧化掉。如果在地槽的生成、演化和结束的期间，有机物质完成了第二次循环，它就要遭受深埋作用，并且受到成岩作用、退化作用和最后的变质作用所控制。成岩作用和退化作用的过程对石油的生成是非常重要的。

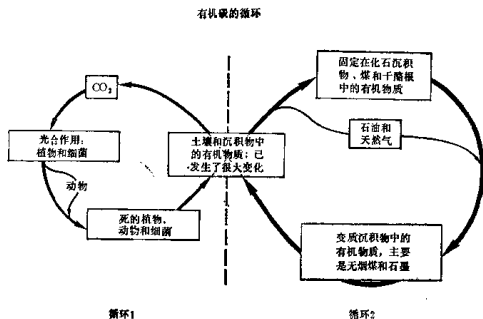


图1.1.6 地壳上有机碳的两个主要循环。有机碳主要是在循环1中再循环。从循环1转换到循环2的只是相当于原始有机产量0.01~0.1%的少量物质（根据Weite, 1970）

1.3 黑海中有有机碳的估算

黑海可作为代表生油岩型沉积物形成条件的一种模式。以下的看法主要是根据德赛尔 (Deuser, 1971) 的发现和认识。

在黑海中，主要的有机物质来源是原地的光合作用（图1.1.7）。最小的单细胞藻类起了主要的作用。海洋生命的主要组合系直接或间接地由它们的产率而决定。近2000年来，通过行光合作用的生物，每平方米一年大约产生100克的有机碳，并覆盖了整个海水覆盖的地区。此外，一定数量的有机碳（不到10%），作为碎屑物质通过河流以及亚速海和马尔马拉海而进入黑海。希姆库斯和特里莫尼斯 (Shimkus and Trimonis, 1974) 估计，通过河流进入黑海的有机碳大约是总输入量的三分之一。此外，化学合成也可作为有机碳的一种来源。这就是通过自养细菌再合成有机碳，这种有机碳的数量尚未精确的了解，估计每平方米一年不到15克有机碳。

产生在黑海中和携带进入到黑海中的大部分有机碳，在水层上部的200米由于呼吸作用而被氧化成为 CO_2 ，并且返回到水圈-大气圈系统中。直接返回到初期有机碳循环（图1.1.6）从而再一次被光合作用所利用的有机碳数量可能接近于80%。一小部分也可被带走而进入马尔马拉和亚速海。其剩余部分则转移到水源200米以下的厌氧水体中去，在这里主要受化学

和微生物反应的控制。可靠的估计是大约80~95%的有机碳系在顶部的水柱中再循环，这里具有光合作用的活动。

在厌氧带，德赛尔(Deuser, 1971)认为是一个稳定状态的情况。被硫酸盐还原而氧化的和溶解作用和石化作用而损失的有机物质，由于上部水层(水中含有大量氧)相等数量有机物质的进入而保持平衡。

大约有四分之一的有机碳进入黑海的厌氧带而埋藏在沉积物中，然后被石化。这个数量是输入黑海中总有机碳的4%。这确实比正常固定在海相沉积物中的平均有机碳要多，黑海中具有较高保存率的主要原因可能是在缺氧情况下，有机物质的降解作用较慢。在一定范围内，高的沉积速率也有助于有机物质的保存。保存有机物质的这两个重要因素是难以定量的。在不同的环境和地区是有某些变化的。可以清楚的看到，像在三角洲地区，高的沉积速率要比厌氧的水体更为重要，而在封闭、停滞的水体中，厌氧的水体应具有更大的影响。以黑海作为对比的基础，亚马逊河每年大约排出 10^{11} 吨有机碳(Williams, 1968)。这比黑海总的有机碳年产量要高约10倍。亚马逊河的径流大约相当于世界河流总流量的20%。

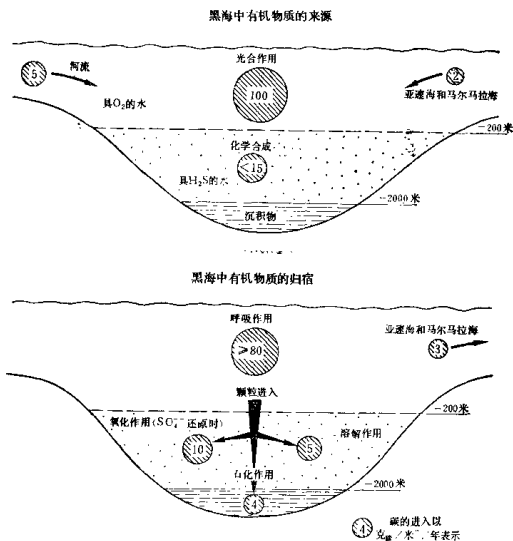


图1-17 近2000年来黑海中有有机碳的估算。上图：有机物质的来源，以克/米²/年计算。下图：有机物质的归宿。大约有机碳总输入量的4%固定在沉积物中。这个值比广海洋的值要大得多(根据Deuser修正, 1971)