

普通高等教育“九五”国家级重点教材
中国矿业大学新世纪教材建设工程资助教材

NENGYUAN DIZHIXUE

能源地质学

陈家良 邵震杰 秦 勇 编著

中国矿业大学出版社

102
53

能源地质学

陈家良 邵震杰 秦 勇 编著

中国矿业大学出版社

前 言

能源是可以直接或通过转换为人类提供所需有用能的资源。地球的能源分为可再生能源和非再生能源,可再生能源包括太阳能、地热能、水力能、风能、海洋能、生物质能、氢能等;非再生能源包括煤、石油、天然气、油页岩、核能等能源。目前,人类利用的能源90%是非再生能源,即煤、石油和天然气,而可再生能源仅占10%。

煤、石油、天然气和水力能很早就已大规模地用于人类的生产和生活中,故称为常规能源或传统能源,而太阳能、地热能、核能、海洋能等应用较晚,并需要新的技术基础上加以系统开发和利用,称为新能源。煤、石油、天然气、水力能从自然界得到后便可直接利用,称为一次能源,而经过加工或转换得到的能源,如电力、煤气、热能、氢能等称为二次能源。地球上的能源,主要来自太阳时刻进行着的热核反应所释放出来的极其巨大的能量,这种热能使地球上产生大气和海水的对流和循环,造成风能、波浪能、洋流能,造成蒸发、降雨等水的循环,植物利用太阳光进行光合作用而得以生长和繁衍,动物依靠植物而生存,由于动植物的死亡、堆积、埋藏和变化而生成煤、石油、天然气、油页岩等化石能源。地热能则是地球自身产生的能源,而潮汐能是太阳系行星运行对海水、湖水等引力转换的结果。核能是人类利用人工的方法,使原子发生核裂变或核聚变而产生出的巨大能量。

目前人类利用的能源主要是化石能源,即煤、石油和天然气,其次是水力能和核能。据统计资料,世界上煤炭资源量约为15万亿t,目前每年的产量50多亿t;石油资源量约为3000亿t,年产量50亿t;天然气的资源量约为400万亿 m^3 ,年产量5万亿 m^3 (相当于50亿t石油的发热量)。目前世界能源的生产构成为:石油占40%,煤占27%,天然气占23%,水电和核能占10%。但从资源量看,煤占84%,而石油和天然气仅占6%。从能源的生产和利用的发展趋势来看,未来的几十年中,天然气的利用强度将超过石油和煤,核能和太阳能也会得到较快的发展。就中国的能源资源而言:煤炭资源量占95%,石油和天然气仅占5%。中国目前能源生产构成是以煤为主,即煤占75%,石油占12%,天然气占4%,水电占7%,核能占2%。在未来的二三十年中,中国的能源中煤仍占重要地位,但比例会有所下降,而天然气、石油、水电、核能将会上升,新能源也将得到较快的发展。

煤炭开采的环节多、难度大、成本高、运输不便,利用时对环境和大气的污染比较严重,开采后造成地表塌陷,但煤炭是发电的主要燃料,也是炼铁所需焦炭的惟一来源,更是重要的民用燃料和化工原料;天然气的开发成本较低,运输方便,利用时工艺流程较简单,操作方便,无灰渣,污染小,是一种优质的洁净能源;石油是汽车、飞机、轮船、拖拉机、柴油发动机的主要燃料,各种机器用的润滑油原料,石油也是极重要的化工原料,其化工产品有几千种之多,如合成纤维、合成橡胶、合成塑料、化学肥料、农药、医药、炸药、溶剂、染料等等,多数来自石油,它是工农业生产、国防、科学技术不可缺少的燃料和原料;太阳能、地热能、核能、氢能、水力能等能源,多数污染小,热效率高,可再生,但有的生产技术比较复杂,目前的生产成本较高。在今后相当长的一段时间内,化石能源仍然是人类的主要能源,还要继续开发和利用,但对环境的污染方面要加以改进。新能源将会得到积极的开发和利用,但很多理论和应用技术问题尚需深入研究和解决。

本教材的主要内容是研究化石能源,即煤、石油、天然气和油页岩的形成、物质组成和性质、聚集和分布规律、资源评价方法等,对太阳能、地热能、核能、风能、水力能、海洋能、生物质能、氢能等,只作基本知识的简单介绍。本教材主要适用于煤炭、石油、地矿类院校的学生,目的在于拓宽学生的专业知识面,更好地适应当前改革开放形势的需要。由于学时的限制,很多问题不能深入展开讨论。该教材适合于80~100学时的教学安排,并可采用实验课和录像课辅助教学。本书由中国矿业大学陈家良副教授(前言、第二章、第三章、第八章第四节)、邵震杰教授(第五章、第六章、第八章第二节及第三节)、秦勇教授(第一章、第四章、第七章、第八章第一节)编著,全书由陈家良副教授主编。编写过程中,得到了许多专家学者的关心和帮助,参考并利用了許多作者的论著,在此表示衷心的感谢。由于编者水平所限,书中不足之处敬请读者批评指正。

编著者谨识
1999年11月

目 录

前 言	1
第一章 沉积有机质的形成与聚集	1
第一节 沉积有机质的成因	1
一、沉积有机质的来源	1
二、生物解剖结构与化学组成	4
三、生物质向沉积有机质的转化	10
第二节 近现代沉积有机质的物质组成	14
一、沉积有机质的三重属性	14
二、腐植酸的化学组成	16
三、可抽提沥青的化学组成	18
第三节 沉积有机质的聚集	20
一、陆地与海洋的沉积环境组合	20
二、泥炭的聚集环境	22
三、分散有机质的沉积分配	25
四、沉积有机质的分布	28
第二章 沉积有机质的物质组成	31
第一节 煤的物质组成	31
一、煤的岩石组成	31
二、煤的化学组成	58
第二节 石油、天然气和油页岩的物质组成	69
一、分散有机质的分类和有机质的类型	69
二、石油的化学组成	74
三、天然气的物质组成	80
四、油页岩的物质组成	84
第三章 沉积有机质的性质和利用	86
第一节 煤的性质和利用	86
一、煤的物理性质	86
二、煤的化学工艺性质	95
三、煤的分类	113
四、煤的用途及对煤质的要求	121
第二节 石油、天然气和油页岩的性质和利用	130
一、石油的性质	130
二、石油的工业利用	131
三、天然气的性质	141

四、天然气的利用	144
五、油页岩的性质和利用	145
第四章 沉积有机质的演化作用	148
第一节 演化的阶段与标志	148
一、沉积有机质演化阶段	148
二、沉积有机质演化标志	150
三、沉积有机质演化跃变	152
第二节 演化的产物	153
一、固态有机质产物	153
二、流体有机质产物	154
第三节 演化的地质—地球化学机理	159
一、沉积有机质演化的地球化学机理	159
二、沉积有机质演化的反应动力学模型	163
三、沉积有机质演化的地质因素	164
第四节 沉积有机质的演化类型	168
一、沉积有机质的深成演化作用	168
二、沉积有机质的岩浆热演化作用	170
三、沉积有机质的动力演化作用	173
第五章 煤层和油气藏的形成和变化	175
第一节 成油、气、煤的沉积体系	175
一、能源资源与沉积体系概述	175
二、冲积扇沉积体系	176
三、河流沉积体系	180
四、湖泊沉积体系	184
五、三角洲沉积体系	188
六、滨海带、浅海带各种沉积体系	194
七、深海沉积体系	202
第二节 煤层的形成和变化	209
一、煤层的形成和煤层的特征	210
二、煤层厚度和形态变化及其控制因素	213
第三节 油气藏的形成、运移和聚集	225
一、油气的储集层与生、储、盖组合	225
二、油气的运移与圈闭	230
三、油气藏的形成与类型	234
第六章 能源资源聚集分布及能源盆地	238
第一节 地壳中煤、油、气聚集的控制因素	238
一、控制能源资源聚集的地质因素	238
二、煤、油、气资源在地质历史中的分布	241
第二节 能源盆地	244

一、能源资源的聚集盆地及其特征	244
二、能源资源聚集盆地的分类	246
第三节 盆内结构与盆地演化	257
一、盆内结构	257
二、盆地的超覆扩张和退缩分化	261
三、盆地的侧向迁移	262
四、盆地的反转	266
第七章 化石能源矿产资源评价	269
第一节 化石能源矿产资源特点与评价理论	269
一、化石能源矿产资源评价的基本特点	269
二、化石能源矿产资源评价的理论基础	270
三、化石能源矿产评价一般流程	273
第二节 区域煤炭资源综合评价	274
一、煤炭资源综合评价参数体系	274
二、区域煤炭资源综合评价模型	275
三、区域煤炭资源综合评价结果	276
第三节 常规石油、天然气资源综合评价	278
一、油气资源评价内容与流程	278
二、油气资源量评价方法	280
三、油气地质风险分析	283
第四节 煤层气资源地质评价	285
一、评价参数体系	285
二、煤层气资源量估算方法	286
三、煤层气资源综合地质评价	288
第八章 其他能源资源	292
第一节 太阳能	292
一、太阳能概况	292
二、我国的太阳能资源	293
三、太阳能的利用	294
第二节 地热能	294
一、地热概述	294
二、地热的几个基本概念	296
三、我国地热资源的分布	298
四、地热资源的评价概述	300
第三节 核能	300
一、核能概述	300
二、核能的释放和核燃料的使用	302
三、裂变核燃料资源	304
第四节 水力能、风能、生物质能、氢能	307

一、水力能	307
二、风能	310
三、生物质能	311
四、氢能	312
参考文献	313
图版及图版说明	315

第一章 沉积有机质的形成与聚集

沉积岩或沉积物中的有机质统称为沉积有机质,是形成化石能源矿产的物质基础。沉积有机质本身具有生物学、化学和岩石学的三重属性,因此了解生物组成及其基本化学特征,是进一步研究沉积有机质形成、转化过程及在地壳中聚集分布规律的必备基础。

第一节 沉积有机质的成因

沉积有机质来源于活的有机体及其新陈代谢产物,包括煤、沥青等聚集有机质以及泥岩、灰岩等中的分散有机质。有机体死亡后遭受降解,一部分降解产物通过生物作用进行再循环,一部分通过某些物理化学作用被转化为简单分子逸入大气或水体,另一部分与分解后的生物残体一道,随同矿物质混入沉积物被埋藏下来,形成了所谓的沉积有机质。生物质的原始物质组成以及生物质向沉积有机质转化中的种种物理化学过程,对沉积有机质性质和分布起到了至关重要的控制作用。

一、沉积有机质的来源

(一) 自然界中有机碳的循环

地质体中的碳有还原碳和氧化碳两种基本赋存形式。氧化碳为无机碳,主要赋存在碳酸盐矿物中。还原碳主要为有机碳,尽管在星际天体的地球陨落物(陨石)中也有赋存,同时也可由非沉积作用在地球深部形成,但狭义上指的是生物质通过生物化学作用和沉积作用保存在沉积岩或沉积物中的沉积有机碳,是构成沉积有机质的主要且必要的元素。

碳元素及其化合物在自然界中是循环变化的,沉积有机碳存在两个既相互独立、又有一定成因联系的完整循环,两个循环之间以土壤和表层中的沉积有机质相互联结(图 1-1)。第一个循环从光合作用开始,植物通过光合作用利用二氧化碳而得以生长,植物为动物提供了食物,动植物死亡后在微生物(主要是细菌)参与下被分解缩合而进入沉积物,大量的含碳分解物以二氧化碳形式再次释放大气或水体中去。如果沉积物被进一步埋藏,沉积有机碳就进入了第二个循环,这个循环是在岩石圈中进行的,在此循环中,沉积有机质在地热和地应力的作用下发生演化,先后经历煤化作用(或有机成熟作用)以及石墨化作用阶段,其中部分沉积有机质生成石油和天然气等含碳化合物,最终变成元素碳的石墨,然后随地壳回返和地层的剥蚀风化,在岩石圈表层被氧化成二氧化碳而逸入大气,完成了有机碳第二个循环。这种循环在地质历史中周而复始,为化石能源矿产的形成提供了不竭源泉。

第一个循环是初次循环或原始循环,发生在生物圈、水圈、大气圈和岩石圈表层,周期较短,半衰期一般仅有几天到几十年,除了中间产物泥炭等外,就化石能源矿产的形成而言没有实际意义,但对研究沉积有机质的成因及预测化石能源矿产性质却非常重要。第二个循环为二次循环,循环主要在岩石圈表层进行,半衰期长达几百万年至数亿年,煤、石油、天然气、天然沥青等化石能源矿产以及石墨等非金属矿产在此循环中形成,因此是能源地质学要研究的一项重要内容。

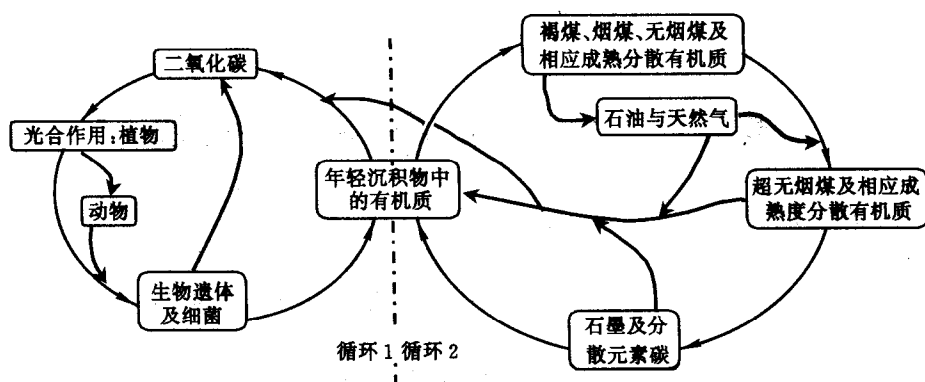


图 1-1 有机碳及沉积有机碳的循环途径(据 Tissot, 1980, 补充修改)

有机碳的循环往往是不完整的:在第一个循环中,生物质中大量有机碳可被直接降解成二氧化碳而完成一个循环;在第二个循环中,某些沉积有机质演化到一定程度就会随地层回返而被抬升至地壳浅处或出露于地表,进而被氧化为二氧化碳或以陆源碎屑形式进入新的沉积物中开始再次循环。在此循环条件下,煤等固体矿产由于埋深变浅而为开采带来便利条件,石油、天然气等流体矿藏却可能遭受破坏,但处于地表浅处或暴露于地表的煤会遭受风氧化作用而失去其大部分工业价值。

(二) 沉积有机质的来源

植物是沉积有机质形成的主要来源,动物的软体组织易于分解而很少保存,菌类程度不等地参与了沉积有机质的形成。煤及煤系地层中有机质多来源于高等陆生植物,湖相泥岩、油页岩等优质油源岩中的分散有机质主要由低等菌藻类和某些水生高等植物所形成。在受海水影响的煤中,往往也有相当数量的菌类参与成煤。据研究,华北南部上石炭统太原组煤的有机质中菌类来源可占 10% 以上,微生物至少提供了美国佛罗里达州泥炭有机物质的 5%~10% 以上。

沉积有机质的性质和聚集规模受生物界演化进程的影响(见图 1-2)。最早的低等生物菌藻类化石记录存在于南非威士兰群古老沉积岩,形成于距今约 31 亿~33 亿年前。在距今约 7 亿~8 亿年的中一晚元古代,菌藻等生物开始大量繁盛并持续至今,以至在从元古到新生界的沉积岩或沉积物中均能追踪到低等生物普遍参与沉积有机质形成的踪迹,不仅成为各地质时代分散沉积有机质的主要来源,而且在元古代和早古生代某些特定的环境下聚集形成了最早的煤——石煤。

在距今约 4 亿年的志留纪末—泥盆纪初,植物界登陆,开始了高等植物演化及工业性煤层聚集的地质进程,几乎在植物界的每一重大演化或繁盛阶段,均有大规模聚煤作用发生(见图 1-3)。中一晚泥盆世的裸蕨植物在我国南方形成角质残植煤,石炭—二叠纪蕨类植物的繁盛导致全球性聚煤作用的发生,侏罗—白垩纪裸子植物的繁盛导致我国北方出现了广泛而持久的聚煤作用,早第三纪被子植物的繁盛是造成南、北半球形成巨厚煤层的重要原因。

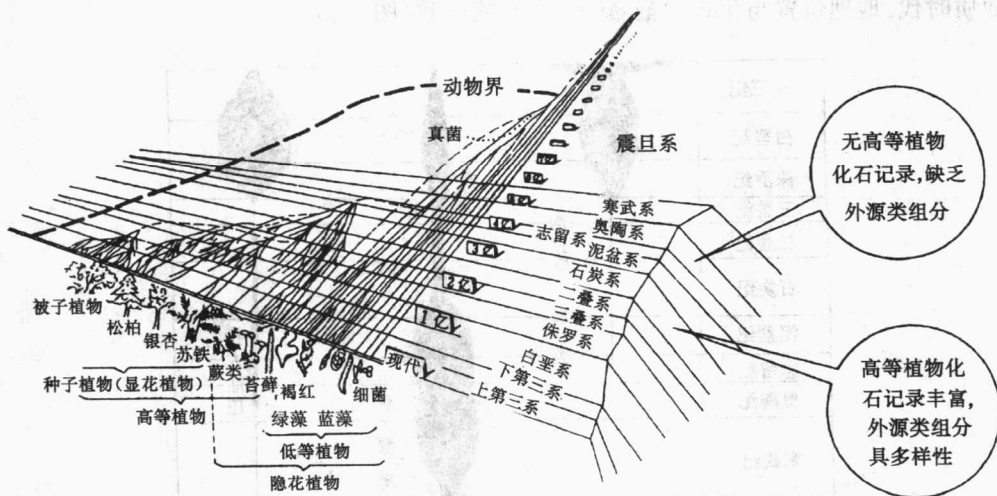


图 1-2 生物进化与沉积有机质地史分布示意图(据钟宁宁、秦勇等,1995)

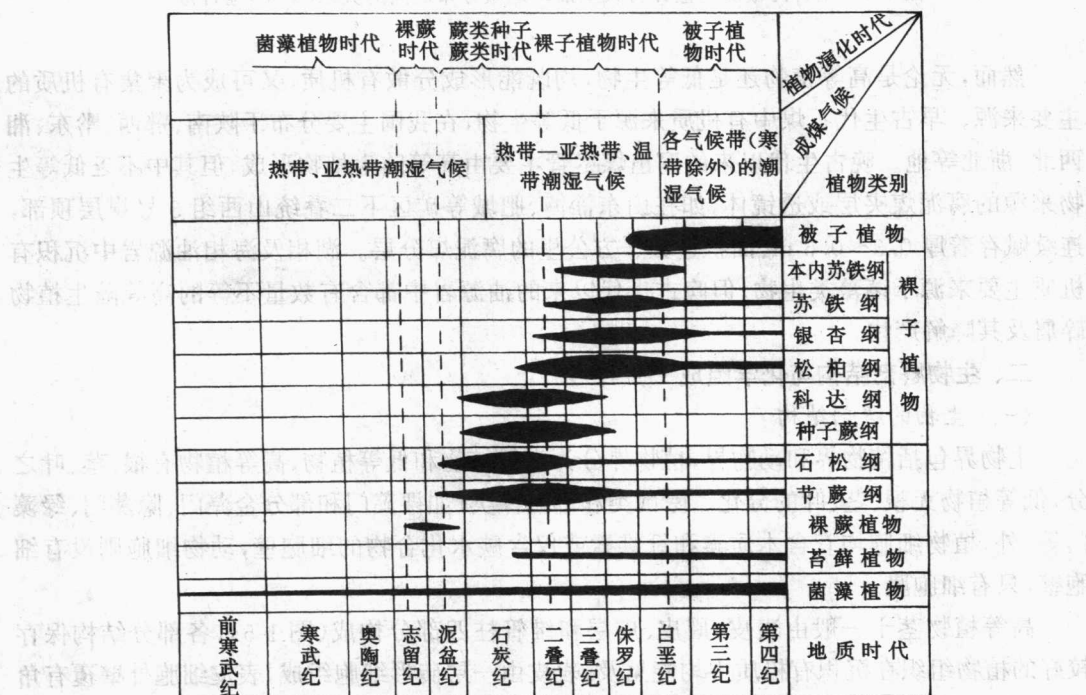


图 1-3 成煤植物演化示意图(据韩德馨等,1980)

海洋、湖泊中的浮游生物有机质是形成石油的主要物质来源。全球有 3 万多个可开采的油田,在其中 200 余个巨型油田的生油岩中都发现有丰富的沟鞭藻和疑源类化石。我国也不例外,如大庆、胜利、辽河、大港、苏北等油田的下第三系生油岩,不仅存在沟鞭藻和疑源类化石,而且也有大量绿藻门的盘星藻、管枝藻以及甲藻门化石。尤其是特大型油田,它们分布

的地质时代、地理位置与化石沟鞭藻的分布高度一致(图 1-4)。

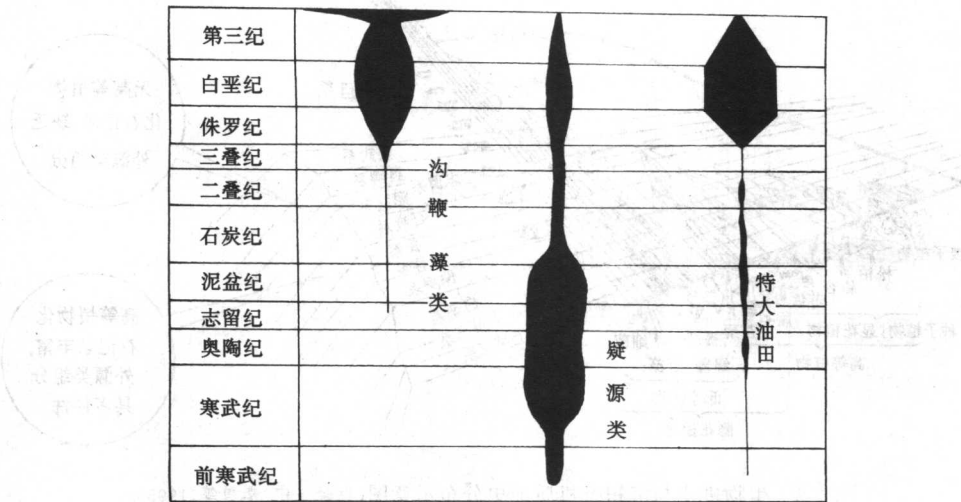


图 1-4 化石沟鞭藻与世界特大型油田地质分布之间的关系(据何承全,1984)

然而,无论是高等植物还是低等生物,均既能形成分散有机质,又可成为聚集有机质的主要来源。早古生代石煤中有机质来源于低等生物,在我国主要分布于陕南、鄂西、黔东、湘西北、浙北等地。晚古生代以来的腐植煤尽管主要由高等陆生植物形成,但其中不乏低等生物来源的腐泥煤夹层或透镜体,如在山东淄博、肥城等矿区下二叠统山西组 3 号煤层顶部,连续赋存着厚 0.3~0.5 m、面积达数平方公里的腐泥煤分层。湖相及海相油源岩中沉积有机质主要来源于菌藻类生物,但晚古生代以来的油源岩中都含有数量不等的高等陆生植物碎屑及其降解产物。

二、生物解剖结构与化学组成

(一) 生物的解剖结构

生物界包括植物界和动物界,植物界分为高等植物和低等植物。高等植物有根、茎、叶之分,低等植物无根、茎、叶的分化。除菌类和部分藻类(如裸藻门和部分金藻门、隐藻门、绿藻门等)外,植物细胞均有含木质素和纤维素或仅含碳水化合物的细胞壁,动物细胞则没有细胞壁,只有细胞膜。

高等植物茎干一般由表皮、周皮、皮层和维管柱四部分构成(图 1-5),各部分结构保存较好的植物组织在沉积有机质中均能见及。表皮由一层砖形细胞组成,表皮细胞外壁覆有角质层,有的还有蜡质,具有保护作用。周皮为次生的保护组织,随茎干的加粗,表皮涨裂死亡,产生出周皮。周皮由木栓层、木栓形成层和栓内层构成,木栓层细胞排列规则,多呈砖形。皮层位于周皮内侧,具有同化、储藏、通气、吸收等功能,由多层细胞组成,其中最主要的是薄壁细胞组织,细胞常为多面体、球形、椭圆形等形状。维管柱一般由维管束、髓部和夹在维管束中间的薄壁组织构成,可以呈连续的圆筒或圆柱状,也可以分散于薄壁组织中间,起输导水分、养分和支撑植物体的作用。维管柱的主要部分被称为木质部,由导管和(或)筛管组成,细胞排列多较整齐。维管束之间呈径向伸长的薄壁细胞,构成放射状结构,在木质部中叫做木

射线,由髓部延伸出来并连通皮层的为髓射线,它们既具有横向输导作用,又可以作为茎的储藏组织。髓部位于维管柱中心,细胞大小不一,形状不规则。

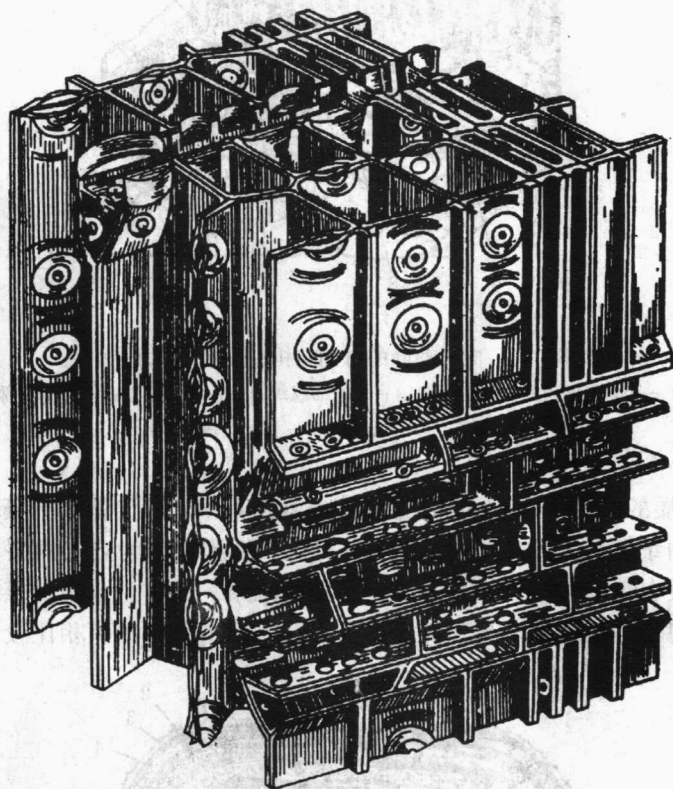


图 1-5 高等植物茎干的解剖结构(据高信曾等,1978)

横列细胞为木射线;纵列细胞为管胞;壁上有具缘孔

高等植物根的解剖结构与茎干相似。不同的是,根的表皮外侧不发育角质层或蜡质,维管柱中一般没有髓部,但某些单子叶植物(如玉米、高粱等)的根中有髓部发育。此外,由表皮组织向外形成根毛组织,起着从土壤中吸收养分的作用。沉积有机质中往往有大量根的组织保存。

高等植物叶片是由表皮、叶肉和叶脉三部分构成(图 1-6)。表皮包围着整个叶片的外围,起保护作用,一般由一层细胞组成,少数叶片表皮具有多层细胞结构,为复表皮;表皮细胞外壁角质化,形成角质层,有的还有蜡质;叶片表皮细胞一般呈扁平的不规则状,彼此之间相互嵌合,没有细胞间隙;在横切面上,表皮细胞表现为长方形或方形,规则排列;此外,叶片表皮还有气孔发育。叶肉是叶片内最发达的组织,由含大量叶绿素体的薄壁细胞组成,是进行光合作用的主要场所;在有背、腹之分的两面叶中,叶肉组织明显地分为栅栏组织和海绵组织两个部分;栅栏组织细胞呈圆柱状,与表皮垂直整齐排列;海绵组织细胞形状不规则,排列疏松。叶脉由维管束和起支撑作用的机械组织构成,维管束的结构与茎干维管束类似。在沉积有机质中,常见角质层、叶脉等结构保存完好的叶片组织。

藻类分为单胞藻和群体藻,最小的藻体以微米来衡量,最大的藻体可达 100 m 以上。可

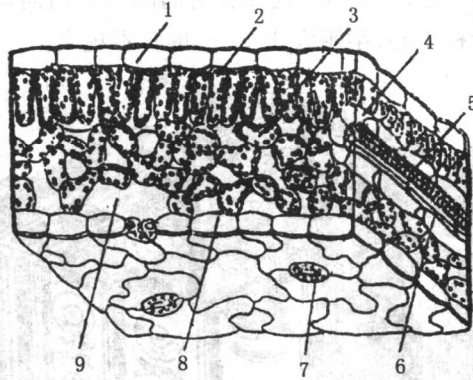


图 1-6 向日葵叶的解剖结构(据高信曾等,1978)

1——上表皮;2——栅栏组织;3——海绵组织;4——维管束鞘;5——木质部;
6——韧皮部;7——气孔;8——下表皮;9——孔下室

以形成沉积有机质的藻类是多种多样的,蓝藻类就是其中之一。蓝藻的藻体有单胞体、群体和丝状体,细胞由细胞壁和原生质体组成(图 1-7)。细胞壁分为内外两层,内层是碳水化合物的,外层是胶质衣鞘,以果胶质为主,或有少量纤维素。在古生代腐泥煤中,常见轮奇藻和皮拉藻化石,它们的解剖结构可与现代浮游生物绿藻门中的丛粒藻相比较。

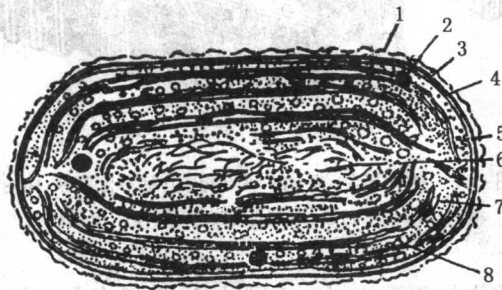


图 1-7 蓝藻细胞解剖结构示意图(据中山大学生物系等,1979)

1——胶质鞘;2——类脂颗粒;3——细胞壁;4——质膜;5——核糖体;
6——原始核;7——光合作用片层;8——糖原颗粒

但是,在沉积有机质中可见藻类生物结构的多是藻体的细胞壁部分,细胞内含物已被分散于沉积基质中。

动物来源的有机碎屑往往是海相沉积有机质的一种重要赋存形式。古生界沉积岩中常见的动物有机碎屑来源于笔石、几丁虫、虫颚以及某些来源不明的动物有机体,均为现代已灭绝了的动物。笔石体由囊、胎管刺等部分组成,表皮中具有纺锤状的包环结构,外皮护带发育其上(图 1-8)。几丁虫的组成部分包括唇、颈、体房、底缘刺等,沉积岩中见到的是其壳囊部分,横切面为环状或扁环状,壳囊壁结构均一而简单,几乎全为几丁质。笔石、几丁虫等对化石能源矿产的形成虽无很大贡献,但为缺乏高等植物来源有机质的下古生界提供了一类可能的有机质成熟度光性标志。

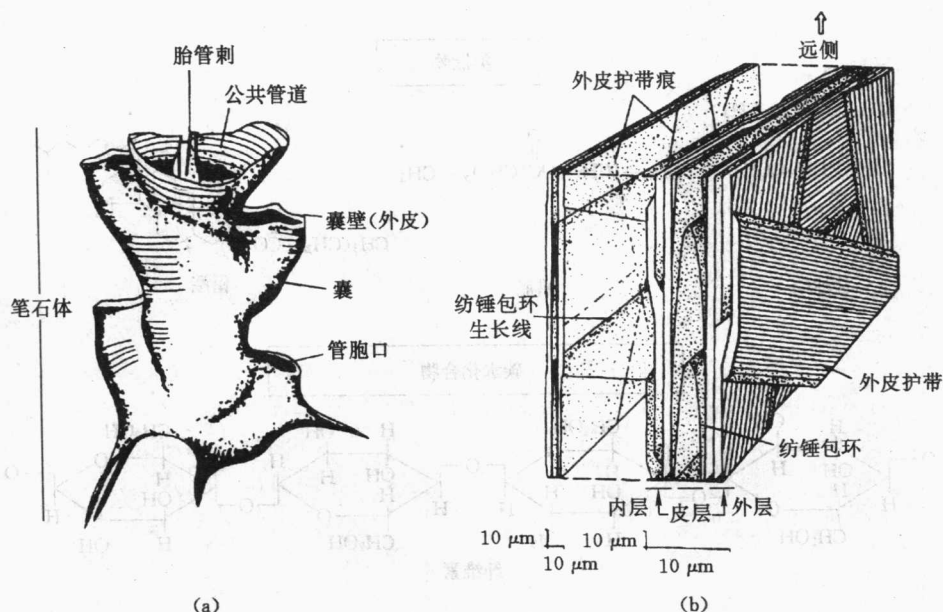


图 1-8 笔石体形态及表皮解剖结构(据 Goodarzi, 1984)

(二)生物物质的化学组成

任何生物体,不外乎主要由碳、氢、氧、氮、硫构成,它们构成碳水化合物、木质素、蛋白质和类脂化合物 4 大类物质,不同化合物的分子结构明显不同,进而导致它们向沉积有机质转化过程中的稳定性有所差异(见图 1-9)。碳水化合物是单糖与其聚合体的总称,包括纤维素、半纤维素、果胶质等,分子通式为 $(C_6H_{10}O_5)_n$,在死亡植物体中易于水解或遭受菌类作用而生物降解。木质素是由苯基丙烷单元构成的三维空间芳香族高分子聚合物,丹宁的化学结构与此类似,相对较为稳定。蛋白质由多种氨基酸单元构成的含氮化合物,结构复杂,高度有序,但具有强烈的亲水性,极易发生水解或生物降解。类脂化合物是一类结构复杂、种类繁多的化合物大类的总称,不溶于水,在常温常压环境中总体稳定性极高,但可被苯、氯仿、乙醚、丙酮等有机溶剂溶解。总体来看,生物体中化合物表现为蛋白质<色素<脂肪<半纤维素<纤维素<木质素<木栓质<种子皮壳<角质<孢粉素<蜡质和树脂的抗降解能力或稳定性序列。

在生物体中,化合物的分布与生物组织有关。纤维素和半纤维素是构成植物细胞壁的主要化学成分,木质素犹如立体的网状物分布于植物机械组织的纤维素微胞之间,蛋白质是生物活细胞内含物的主要成分,类脂化合物是蜡质膜、角质层、木栓层等保护组织和脂肪、色素、树脂等内含物或分泌物的主要化学物质,菌类多无细胞壁或仅具几丁质细胞壁,动物细胞则没有细胞壁而只有胶质细胞膜。

不同生物中化合物的相对含量变化极大(图 1-10)。高等植物的茎干和叶以木质素、纤维素和半纤维素为主,细胞内含物主要为类脂化合物和蛋白质,保护组织、孢粉壁等由类脂化合物构成,木质素在木质部组织中尤为丰富。低等植物以蛋白质和脂肪含量较高为特征,碳水化合物含量也相对较高,缺乏木质素或含量很低。动物和菌类则由蛋白质、非纤维素类

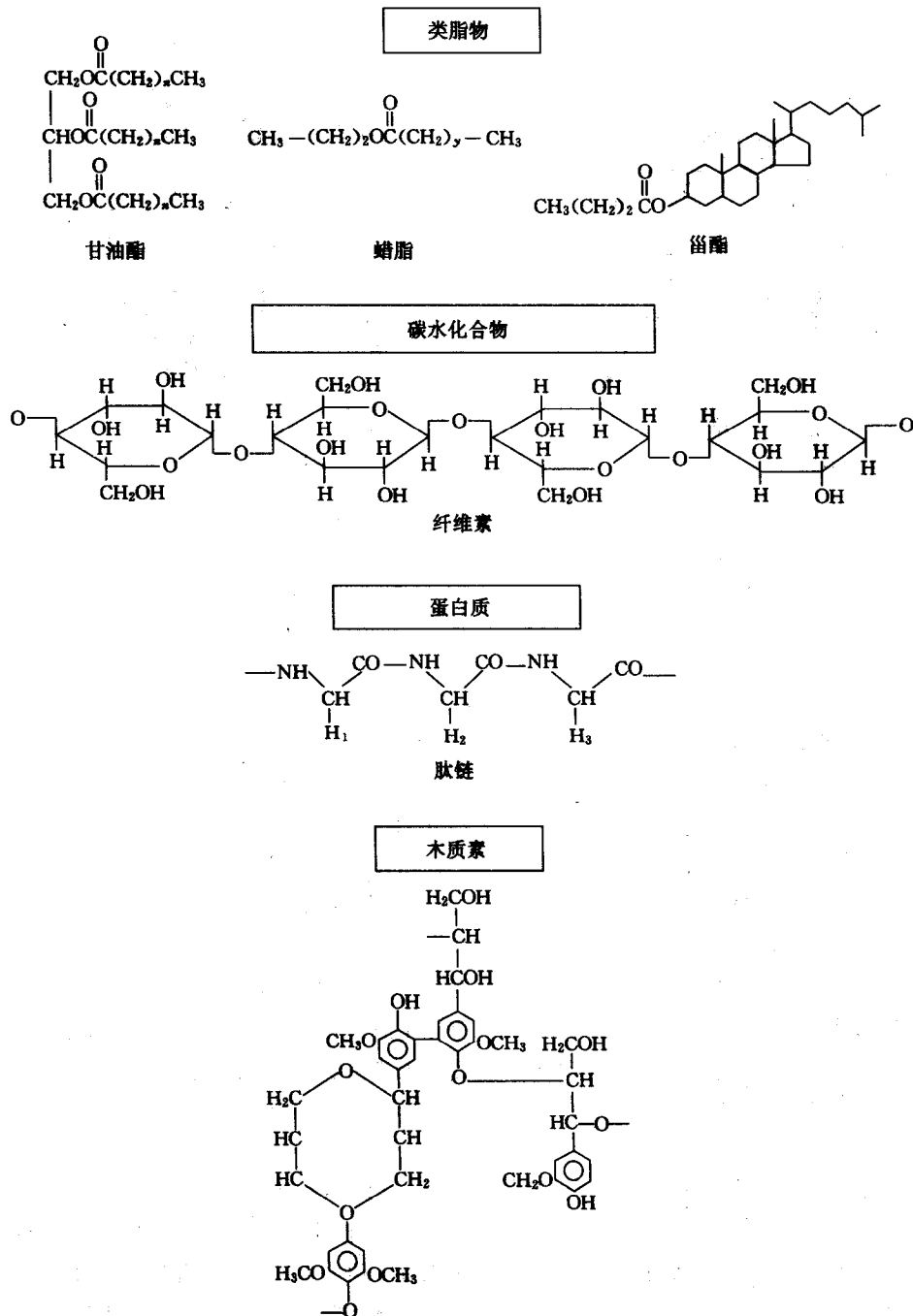


图 1-9 某些生物化合物分子的结构(据 Burand 等,1980)

的碳水化合物以及类脂化合物组成,不含木质素。通常,陆生植物以富含木质素的高等植物为主,水生植物以不含或少含木质素的种类为主。随纬度增高,植物体中所含木质素减少。

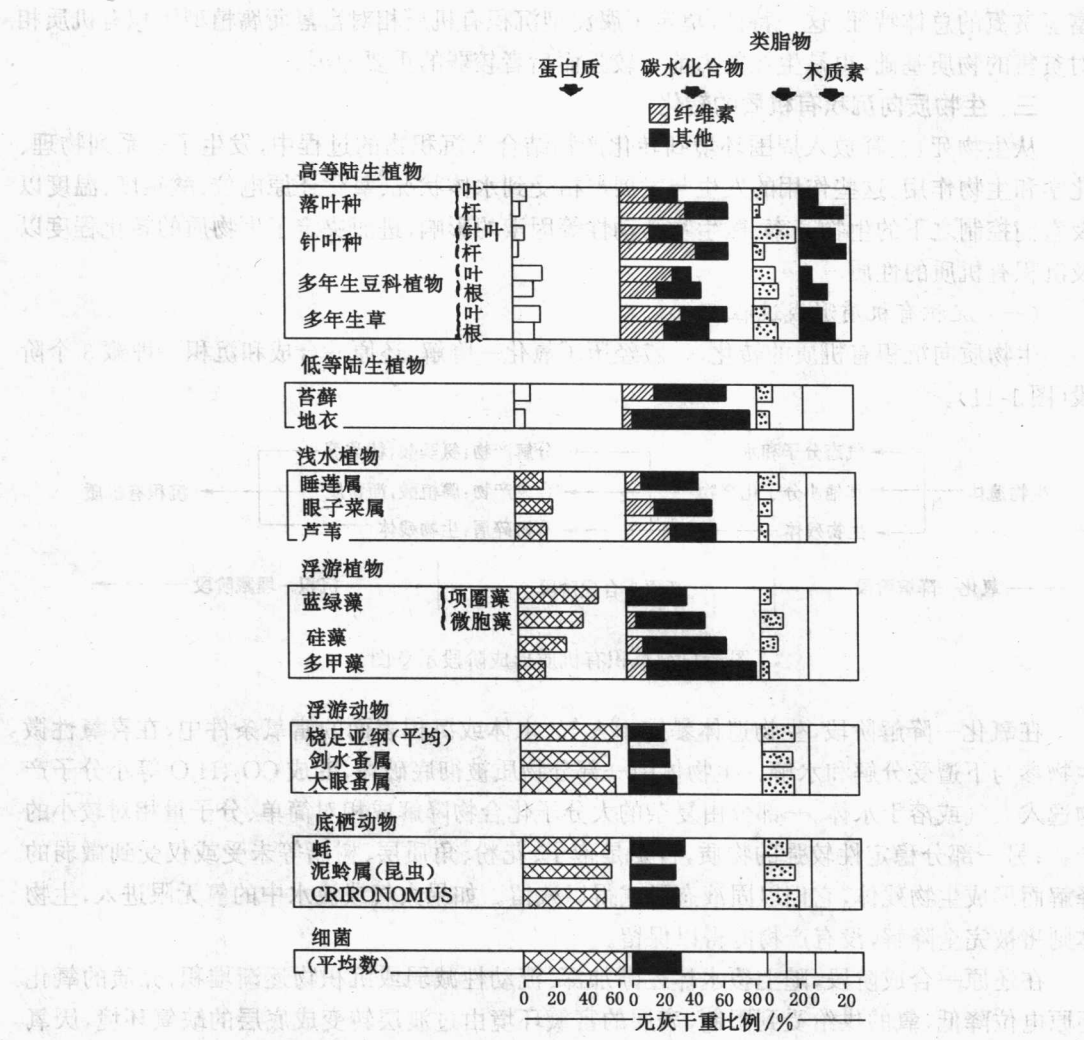


图 1-10 某些生物体化合物组成的比较(据 Burand 等,1980)

生物体中化合物组成的不同,决定了不同生物有机元素组成的差异,影响到沉积有机质的元素组成特征和生烃行为。如表 1-1 所示,木质素和碳水化合物元素组成富碳、富氧和贫氢,蛋白质富氮富硫,类脂化合物则富氢、富碳而贫氧,造成高等植物富碳贫氢和低等植物

表 1-1 植物及其化合物的元素组成(据任德懿,1979)

元素 /%	化 合 物									植 物		
	木质素	丹宁	纤维素	蛋白质	脂肪	蜡质	角质	树脂	孢粉质	浮游植物	菌类	陆生植物
C	62.0	51.3	44.4	53.0	77.5	81.0	61.5	80.0	59.3	45.0	48.0	54.0
H	6.1	4.3	6.2	7.0	12.0	13.5	9.1	10.5	8.2	7.0	7.5	6.0
O	31.9	44.4	49.4	23.0	10.5	5.5	29.4	9.0	32.5	45.0	32.5	37.0
N	—	—	—	16.0	—	—	—	—	—	3.0	12.0	2.8