

“十二五”
国家重点图书

低碳经济的 工程科学原理

Scientific and Engineering Principles of
Low Carbon Economy

金涌 朱兵 陈定江 编著



化学工业出版社

“十二五”
国家重点图书

低碳经济的 工程科学原理

 Scientific and Engineering Principles of
Low Carbon Economy

金涌 朱兵 陈定江 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

获取能量的方式和能源利用效率一直是人类文明发展水平的标志，也是制约社会经济发展的重要因素。

该书以低碳经济的资源与环境现实背景为导引，探讨了全球气候变化引发的观点和争论；重点阐述了低碳经济的基础、原理及可实现的工业技术，包括①生产领域节能减排，②消费过程减少能源消耗，③开发多种可再生能源，④CO₂等温室气体的捕集，重复利用和埋藏技术等；相应的政策法规的制定及新兴的碳金融。

全书内容丰富，涵盖面广，涉及低碳经济的科学、工程、社会、政治、经济等多个方面，是一部不可多得的低碳经济领域的专著。

本书可供化工、能源、环境等相关专业的师生、研究人员参考，也可供政府和企业工作人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

低碳经济的工程科学原理/金涌，朱兵，陈定江编著.
—北京：化学工业出版社，2012.2
“十二五”国家重点图书
ISBN 978-7-122-13209-3

I. 低… II. ①金… ②朱… ③陈… III. 工业技术
IV. T

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 004630 号

责任编辑：袁海燕 陈 丽
责任校对：周梦华

装帧设计：王晓宇

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）
印 刷：北京永鑫印刷有限责任公司
装 订：三河市万龙印装有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 21½ 字数 556 千字 2012 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899
网 址：<http://www.cip.com.cn>
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：98.00 元

版权所有 违者必究

序 (一)

气候变化问题事关人类的生存和发展，是当今世界共同面临的热点问题。控制温室气体排放，加快发展低碳技术和低碳产业，实现低碳绿色增长，是未来的发展趋势。我国高度重视气候变化问题，在推进国内经济社会发展过程中，采取了一系列积极应对气候变化的政策和行动，确定了到 2020 年在 2005 年基础上单位 GDP 二氧化碳排放下降 40%~45% 的目标。为了实现这一目标，需要采取多方面的措施和行动，包括优化产业结构，实施重点节能工程，推动节能技术改造，加快节能技术和产品的开发与推广，发展循环经济，推进共伴生矿产资源、大宗固体废物、农作物秸秆等综合利用，提高资源利用效率等等，以及制定相应的激励性政策。

低碳发展需要科学与工程技术的指导。清华大学近年来在国家发改委、环保部的指导和支持下，系统地开展了循环经济、低碳经济相关领域的科学研究，在国内外学术界、工业界都产生了较大的影响，成为该领域的学术中心之一。继 2009 年出版《资源·能源·环境·社会——循环经济科学与工程原理》专著之后，清华大学金涌院士带领的团队又进一步完成了《低碳经济的工程科学原理》一书，主要内容包括世界能源资源状况与温室气体排放总体形势、碳排放与全球气候变化、低碳经济引发的世界经济挑战与政治博弈、碳元素代谢、热力学基础、生产过程中含碳能源的减量化与碳减排、低碳过程系统集成技术、可再生能源及新能源的开发、二氧化碳捕集-封存-再利用技术、低碳城市与低碳生活、国内外政府实施低碳经济的政策与法规、低碳经济与碳金融，从不同方面阐述了低碳经济的发展和理论基础，同时也阐述了低碳技术低碳产业的发展途径。不同于已有的同类著作，本书更加突出了低碳发展的工程技术问题和方法的阐述，综合了政策、经济、工程技术乃至生活消费等低碳经济的诸多方面，弥补了这一交叉学科著作的不足。本书对不同学科的大学生、研究生和各界人士更新理念、开阔视野、开展研究有很好的参考价值。



2012 年 2 月

序（二）

改革开放 30 多年来，中国的经济发展取得了令人瞩目的成就，年均经济增长保持了近 10% 的快速水平，国内生产总值居世界前列。但同时长期形成的粗放型增长方式尚未根本改变，工业化、城镇化快速发展与能源资源和生态环境的矛盾日趋突出，影响科学发展的体制机制障碍依然存在，转变经济发展方式迫在眉睫。

放眼全球，可再生能源、绿色能源正处在替代化石能源的前期，循环经济、低碳技术方兴未艾。在未来一段时期内，这些领域的技术将成为推动全球发展、转变世界经济发展方式的新动力。对于我国来说，能否抓住这次历史变革的机遇，将对我国未来产生极为深远的影响。

作为发展中的大国，我国正在全力贯彻落实科学发展观，努力建设资源节约型与环境友好型社会，大力倡导循环经济，并把节能减排、发展低碳技术作为国家发展的重要任务。在我国，推行低碳发展已经成为转变经济发展方式、促进经济社会可持续发展的当务之急。不发展低碳技术，实现经济发展方式的转变，我国的资源能源将难以支撑，生态环境将难以承受，国家竞争力将难以提升，国家安全也将难以保障。这就要求我们必须把发展低碳技术提到国家战略层面上加以思考。

1. 资源能源难以支撑。我国的资源总量和人均资源都严重不足，而资源消耗的增长速度却十分惊人。在资源总量方面，我国石油储量仅占世界 1.8%，天然气占 0.7%，铁矿石不足 9%，铜矿不足 5%，铝土矿不足 2%。在人均资源量方面，我国 45 种主要矿产资源人均均为世界平均水平的 $1/2$ ，人均耕地、草地资源为 $1/3$ ，人均水资源为 $1/4$ ，人均森林资源为 $1/5$ ，人均石油占有量仅为 $1/10$ 。我国的国内资源已难以支撑传统工业文明的持续增长，现实状况要求我们必须通过加快转变经济发展方式，缓解经济增长中环境代价太大的问题。

2. 生态环境难以承受。当前，我国面临的环境形势十分严峻。我国现有荒漠化土地面积已占国土总面积的 27.9%，而且每年仍在增加 1 万多平方公里；我国七大江河水系，劣五类水质占 27%，75% 的湖泊出现不同程度的富营养化；我国 600 多座城市中有 400 多座供水不足，其中 100 多个城市严重缺水；我国尚有 3.6 亿农村人口喝不上符合卫生标准的水；2010 年环保重点城市空气污染物检测中，有近三成的城市空气质量劣于国家二级标准；全国酸雨面积约 120 万平方公里，约占国土面积的 12.6%，人民身体健康受到严重损害。我国的生态环境状况已临近生态阈值，难以支撑当前的高污染、高消耗、低效益生产方式的扩张。

3. 国家竞争力难以提升。产业要在国际上开拓市场，一般需要经过三个阶段：首先靠劳动力、土地资源、政策优惠发挥“成本优势”；获得一定资本积累后进行研发产生“技术优势”；然后自创名牌，在国际竞争中发挥“品牌优势”。但目前我国仍处在“成本优势”为主的阶段，必须加强原始自主创新，尽快向“技术优势”和“品牌优势”过渡。否则，我们的“打工经济”在生产过程中消耗的大量能源和造成的环境污染等隐形损失，与所获得利润相比将得不偿失。特别是我国加入世贸组织以后，国际上各种严格的法规和标准接踵而来，资源环境因素在国际贸易中的作用日益突显，形成了事实上的贸易壁垒，这成为我国扩大出

口面临最多也是最难突破的问题。

4. 国家安全难以保障。目前,我国对外技术依存度高达50%,美国、日本仅为5%左右;我国的设备投资有60%以上要靠进口。更何况涉及战略需求的核心技术,就是花再多钱别人也不会卖给我们。同时,我国重要资源对外依存度也不断上升。目前我国先进技术和主要资源的对外依赖度已经达到了一个相当高的水平,国家的能源安全、经济安全受到严重威胁。

同时,我们要清醒地认识到,目前我国推行低碳发展、转变经济发展方式,尚有一定的难度,这与我国所处的阶段有关。

其一,随着经济全球化的深入发展,国际产业分工加快重组,国际产业结构不断调整,而我国由于经济整体素质不高,在国际产业链中,处于不利的分工地位。承受着随之而来的资源、环境代价。

其二,我国进入工业化中期,这一时期产业结构特点是“重化工业”加速发展,导致资源能源消费增加。我们必须重视重化工业的层次提升和节能减排的结构调整与技术进步,避免少数地方盲目发展和引进重化工业中的高能耗、高污染项目,造成资源能源的双重压力。

其三,中国特色社会主义道路要求工业化与城镇化同时并举。城镇化进程加快,城市人口增加,基础设施规模加大,生活模式明显改变,人均生活能源消费量较快增长。

其四,政府职能的改革与市场经济的完善。如何配置资源合理利用能源,减少环境污染既是政府的职能,也是市场经济完善的表征之一,应避免政府失灵和市场失灵并存的现象,做好政府职能的改革和调整,对市场经济必须要加以引导和完善。

低碳发展作为我国转变经济社会发展方式的一个重要突破口,编写著作进行专题研究,加强宣传,以引导更多有识之士关注低碳发展,投身可持续发展事业,共同化解我国在快速发展过程中经济增长与环境安全所面临的各种矛盾,对未来中国又好又快发展是非常有价值的。

从理论层面看,一个学科要为社会所承认,往往需要五个条件:第一,大学里必须有门课;第二,必须有本经典著作;第三,必须有独特的、科学的学术范式;第四,必须有个相关的专业协会;第五,必须有几名著名的专家、教授。低碳发展如果要成为一个独立的学科,也概莫能外。金涌先生是中国工程院院士,资深化工专家,近年来从事循环经济、低碳发展研究卓有成就,并率领弟子们为推动我国循环经济、低碳发展的理论和实践发展作出了不懈的努力。

本书从地球能量利用演化史的宏大视野中展开,阐明低碳经济时代实际上是人类社会经济发展过程中一个必不可少的过渡期。在对低碳经济这样的一个历史定位下,内容涉及低碳经济的科学、工程、社会、政治、经济等多个方面,不仅包括低碳经济的资源与环境现实背景,全球气候变化引发的观点和争论,而且阐述了低碳经济的基础、原理及可实现的工业技术,还阐述了相关的政策法规制定和碳金融等。该书涵盖面广,知识内容丰富,是一本绿色发展的好书,是一本好著作,值得向读者推荐。

有了金涌院士等一批低碳发展的研究者,如今又有了这本理工学生必读的通用著作,低碳发展作为一门学科的条件已大体具备,我相信在中国对低碳发展的研究将进入一个十分繁荣的大好阶段。

遵嘱是为序。

冯之浚

2012年2月

低碳经济的 工程科学原理

Scientific and Engineering Principles
of Low Carbon Economy

前言

FOREWORD

低碳经济的实质是用低的化石能源消费，以低的 CO_2 排放和低的污染为代价来保证国民经济和社会的可持续发展。

当前世界金融危机影响尚未完全结束，国际上几乎所有大国都在把应对气候变化问题和应对金融危机同步推进，我国社会科学发展观的整体构架可以形象地描述为一个“尖塔”，用来说明低碳经济、循环经济、生态经济、创意经济四个组成部分之间的关系。位于塔尖的是生态经济，强调的是向自然生态规律学习，指导社会经济的可持续发展；位于塔基的是创意经济，强调科技创新是支持社会经济可持续发展的根本。而位于塔身的循环经济和低碳经济是连接塔尖和塔基的纽带。循环经济，强调资源的重复利用、节约资源和减少污染；低碳经济，强调能源的高效利用，可再生能源的开发，减少温室气体排放。两者共同构成了支撑生态经济的基础。低碳经济已成为世界各国的战略重点。

生态经济主要是倡导可持续发展理念，即主张社会生态结构应该向自然生态结构学习。地球自然生态十分完美，所有资源都可在“植物→动物→微生物”间循环利用，而且只需要太阳光的稀薄能源就可驱动这一循环，所以生态循环是一种引领，是一种指导。

循环经济主要着眼于社会资源在生产与消费过程如何实现节约利用、充分利用、多次利用和循环利用问题，解决经济发展中所遇到的自然资源匮乏的瓶颈。

低碳经济主要着眼于社会进步中能源短缺的问题，如何减少化石能源的消耗，开发核能、太阳能及其延伸的二次能源，如水能、风能、潮汐能等。化石能源是以碳、氢元素为载体的能源，减少它的使用，当然就减少了 CO_2 的排放，保护了环境。

以 2010 年我国一次能源消耗 32.5 亿吨标准煤计算，如按当前年能耗 8.9% 速度递增，2020 年全国能耗预计达到 76.3 亿吨标准煤，将约占世界总量的 50%。如 GDP 以 7%~9% 的速度上升，即便每五年能耗强度（能耗/万元 GDP）下降 20%，我国 2020 年能耗预计也会达到 40.9 亿~49.2 亿吨标准煤，可见我国能源问题是何等严峻。

循环经济、低碳经济作为人类社会文明和经济发展达到较高水平时对资源和能源有效利用且在不断提升社会生活品质条件下的经济模式，其目标如果仅仅依靠当前已有的科学技术是无法完成的，低生产能力下简单地节约消费不是循环经济和低碳经济。只有效法自然生态规律，通过不断地创新构建产业生态链，研究和开发新的科学技术才可能完成，所以创意经

济是实现上述任务的基础。

2012年1月16日，温家宝总理在“第五届世界未来能源峰会（阿布扎比）”上讲到：“最终解决未来能源问题，并不取决于对能源资源的拥有，而是取决于对能源高科技的拥有，取决于能源科技革命的突破性进展。”这也充分说明了科技创新在发展低碳能源过程中的作用。

本书将对世界和我国能源状况、能源消费总体形势、可再生能源开发、CO₂减排问题、在生产和消费环节节约能源的工程科学和技术途径、我国能源战略的转变方针和策略等进行讨论。目的是为读者提供更多的背景材料，尽量兼收并蓄地呈现出不同的学术观点，以便读者对这样一个多学科交叉的且有重大意义的问题做出判断。

区别于现行的许多同类型的出版物，本书更加侧重于工程技术问题的研究，所以它既适合于攻读理工学科和人文社会学科的大学生、研究生作为辅助教材，也可作为有关工程技术人员、企业家、政府工作人员决策时的参考材料。

参加编著本书的作者及其分工如下：

导论：金涌、朱兵；第1章：余亚东、金涌、胡山鹰；第2章：洪丽云、朱兵；第3章：周文戟、朱兵；第4章：马敦超、胡山鹰；第5章：沈静珠；第6章：朱兵、金涌；第7章：周禹成、胡山鹰、陈定江；第8章：雪晶，金涌；第9章：洪丽云、朱兵、金涌；第10章：黄宁宁、陈定江；第11章：刘晓宇、朱兵；第12章：雪晶、金涌。

编著者
2012年2月

低碳经济的 工程科学原理

Scientific and Engineering Principles
of Low Carbon Economy

目录

CONTENTS

引言： 低碳经济——人类社会发展的新里程碑

Page 001

参考文献 5

第 1 章 世界能源资源状况与温室气体排放总体形势

Page 006

1.1 煤炭资源	7
1.2 石油资源	10
1.3 天然气资源	18
1.4 核能资源	23
1.5 水能资源	25
1.6 可再生能源	27
1.7 世界一次能源消耗及碳排放现状	30
1.8 小结	32
参考文献	32

第 2 章 碳排放与全球气候变化

Page 034

2.1 IPCC 报告的主要结论	34
2.2 温室效应的大气物理化学探索	45
2.3 全球气候变暖的其他观点	53
参考文献	56

第 3 章 低碳经济引发的世界经济挑战与政治博弈

Page 057

3.1 国际社会关于气候变化问题的谈判	57
3.2 发达国家在哥本哈根会议前的舆论操控	60
3.3 哥本哈根会议前各方碳减排方案简介	62
3.4 哥本哈根会议上的政治博弈	63
3.5 坎昆会议的成果落实及未来展望	64
3.6 世界各国应对气候变化的态度	65
3.7 小结	66

参考文献	67
------------	----

第 4 章 碳元素代谢

Page 068

4.1 自然生态演化中的碳循环	68
4.2 工业社会的碳元素代谢	83
4.3 我国碳代谢变化趋势	85
4.4 小结	97
参考文献	97

第 5 章 能量高效利用的热力学基础

Page 101

5.1 热力学基本原理解读	101
5.2 热力学相关参数解释	104
5.3 能源利用效率	109
5.4 节约能源消耗提高能源利用效率的热力学途径	111
参考文献	117

第 6 章 生产过程中含碳能源的减量化与碳减排

Page 118

6.1 概论	118
6.2 工业生产过程的碳减排	127
6.3 若干重要的通用节能减排技术	155
6.4 产品节能和二氧化碳减排	166
6.5 再生资源炼制与再制造工业中的节能减排	168
6.6 小结	171
参考文献	171

第 7 章 低碳过程系统集成技术

Page 173

7.1 能量集成技术	173
7.2 低碳能源系统集成技术	189
7.3 碳减排的物质集成技术	198
参考文献	204

第 8 章 可再生能源和新能源的开发

Page 206

8.1 可再生能源	206
8.2 太阳能开发利用	208
8.3 水能开发利用	213
8.4 风能开发利用	216
8.5 生物质能开发利用	220
8.6 地热能开发利用	224
8.7 海洋能研究与开发利用	228
8.8 核能开发利用	232
参考文献	238

第 9 章 二氧化碳捕集、封存、再利用技术

Page 240

9.1 二氧化碳的捕集技术 240

9.2 二氧化碳的封存技术 247

9.3 CO₂ 的直接利用 251

9.4 CO₂ 的大规模再利用 253

9.5 小结 256

参考文献 256

第 10 章 低碳城市与低碳生活

Page 258

10.1 城市化与低碳城市 258

10.2 低碳城市与工业园区规划 267

10.3 低碳交通 269

10.4 低碳建筑 272

10.5 低碳基础设施 274

10.6 低碳生活与低碳产品 278

参考文献 279

第 11 章 国内外政府实施低碳经济的政策与法规

Page 280

11.1 低碳经济背景下的全球气候管理机制 280

11.2 政府支持低碳经济发展的国际经验 287

11.3 低碳经济在中国的发展 292

11.4 未来发展趋势与政策讨论 298

参考文献 303

第 12 章 低碳经济与碳金融

Page 305

12.1 碳金融理念的形成和发展 305

12.2 虚拟经济与碳金融内涵 308

12.3 国外碳金融发展现状和前景 317

12.4 我国碳金融发展现状及问题 321

12.5 对低碳金融的另类思考 325

12.6 小结 327

参考文献 327

跋

Page 329

索引

Page 330

引言

低碳经济—— 人类社会发展的新里程碑

宇宙演化是一部物质与能量的纠缠发展史，大约 140 多亿年前宇宙大爆炸发生的瞬间，宇宙蕴涵的极大能量激烈释放，它的大小每 10^{-34} 秒就膨胀一倍，不到一分钟，宇宙直径已有 1600 万亿公里，而且至今还在迅速扩展中，在产生引力，电磁力，强核力和弱核力之后，随之产生了光子、电子、质子、中子等，每一秒钟即有 $10^{79} \sim 10^{89}$ 个之多，产生的能量使温度曾高达 100 亿摄氏度，足以引发核聚变反应。初期产生的是氢和氦元素及少量锂。

随着核聚变不断继续进行，会产生出各种原子量更大的化学元素。宇宙大爆炸发生 3 分钟以后，存在于当今物质世界中 98% 的各种元素就已经由核聚变产生出来了^[1]。

科学家对为什么会有宇宙大爆炸目前尚没有确切的认知，但大爆炸一旦开始，物理学者就可给出大致如上所述的景象。

46 亿年前宇宙中某相应的位置上悬浮着一个浓密的由气体和尘埃组成的巨型星云团，该星云团主要成分仍是氢和氦，这一巨大星云团自身的不稳定性，产生引导自发塌陷的可能；从某瞬间开始重力变成主导倾向，使星云团走向收缩；在其核心部位的核聚变反应，产生了巨大的热量，达到数千万度的高温和每平方厘米数百万千克的高压。由此一个由氢核转变为氦核的宇宙空间核反应堆开始运行，我们称为太阳（参见图 0-1）^[2]。

由太阳核心向外释放的核能形成了可见光球，散发着的阳光是赐予地球最慷慨的馈赠，让万物长久受益。在太阳形成的后期，太阳周边环境运行的颗粒群相互碰撞，在其周围聚集成一系列行星并构成太阳系，当时这些由星际尘埃形成的宇宙婴儿不是寂

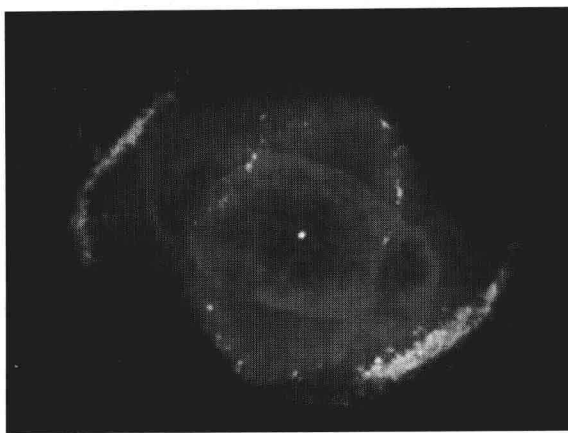


图 0-1 位于天龙座的猫眼星云
(距地球约 4000 光年，可类比于太阳系初始形成期的形态)

死的星球，其中之一就是我们的地球，地球在 45.5 亿年前已完成了约 65% 的汇聚。

最初的数亿年间，有大量的直径数千至数万米的巨大陨石撞击地球，同时放出巨大的能量，它可能是在第二次世界大战中使用过的原子弹释出能量的数十亿倍，再加上地球内部的热核反应产生的热量，使地球处于熔融状态；大量重金属如铁镍元素等集聚于核心，而较轻的元素如硅、钙、镁等元素浮于地球表面。地表岩浆横流，被古地质学者称为地球历史上的冥暗期。随后地球表面冷却，形成地壳。长时间陨石对地球的撞击一直没有停止^[3]，地球历史的局部冥暗期断断续续地出现，持续了约 40 亿年，撞击不断输给地球能量，曾不断出现过多次地质灾害。

在地球表面温度降至 100℃ 左右时形成了大气层，其厚度在两极区有 10km，在赤道附近为 30km；接着水蒸气凝结成雨水，并形成海洋。大气中的水蒸气、CO₂ 等组分产生温室效应，使地球表面温度不会持续降低到接近宇宙深度的绝对零度（-273℃）。地球上 CO₂ 的自然循环始于火山向大气层的喷发，雨水会溶解大气中 CO₂ 使它略成酸性，与岩石表层发生反应，生成碳酸盐沉淀于海床上，形成含碳酸盐的新岩石，这些岩石会被卷入地幔的潜没区，地热高温再次分解出 CO₂，并通过火山喷发返回大气层。这种循环是一个极有效的恒温器。当星球趋于温暖时，雨水增加，加快了大气中 CO₂ 的溶解速率，而使 CO₂ 在大气中含量下降，有利于星球的冷却；当气候转冷时，则雨量减少，使火山喷发出的 CO₂ 在大气层中得以积聚，加强了大气温室效应，使气温回升。这时地球上极强烈之爆发式的能量交换过程慢慢终结，地球演化进入了一个缓和和稳定的热运动过程，即光辐驱动期。源源不断提供能量的太阳，在我们这颗蓝色星球上孕育了生命。

实际上，阳光驱动期在 38 亿年前就开始交替出现。蓝绿藻类在 36 亿~35 亿前出现，在阳光驱动下通过单细胞内的代谢过程，进入氧释放和碳固定过程，CO₂ 在此期间被光合作用利用并转化，实现了一个阳光能量的存储和氧气释放过程。

蓝绿藻类在漫长的地质时代内繁殖，放出的氧气先是被岩石中的化学活性组分和大洋中的铁离子吸收。大约从 22 亿年前开始，大气中 O₂ 成分慢慢从小于 1% 增加到 15% 左右，这一改变对当时的古藻类有毒害作用，古藻类的繁殖受到抑制，这时出现一个较短的氧危机期。大气中氧含量增加无疑会威胁到厌氧生物的繁殖，从而必然进化出一种新的物种，即可以呼吸代谢的物种出现。地质生物化学遗迹表明从 25 亿至 5.43 亿年前，能量转化过程进入一个氧驱动期。在新的嗜氧微生物发酵和厌氧代谢过程中，阳光的作用如同一个电子输送泵由二氧化碳和水合成碳水化合物，同时放出氧气。这时也是一个大量生物质转化为化石燃料过程的开始，即碳水化合物在地质条件下转化为碳氢化合物（煤、石油、天然气）等化石燃料的过程。在碳水化合物和碳氢化合物被燃烧或其他方式利用时，再从环境中吸收氧气，循环生成 CO₂ 和水，同时放出能量。

数百万年前人类出现和自身进化过程中，首先出现嗜火文明期（Pyro-cultural Regime），人类以狩猎为主的经济活动，并学会利用火来烧烤食物。到农业文明期（Agro-cultural Regime），对能源的利用和对其掌握程度就成了人类文明发展程度的标志，这时的能源主要来自地表的植物及其制品木炭。数千年的农业经济对能源需求增长速度较慢，另外由于这些植物能源的可再生性，对地球生态没有造成整体性的明显破坏。地球演化和人类利用能源历程见图 0-2。能量利用的演化见图 0-3。

农业文明期与嗜火文明期的区别在于：人类有计划地进行植物栽培和动物驯养，使社会经济稳步发展，而且社会生态与自然生态更加相互协调。

从瓦特蒸汽机的使用开始，人类借助化石能源的有效利用，把热能转化为机械能，使人类变得越来越强有力，人类社会进入了工业文明时代。科技发展对高能量密度的能源需求强

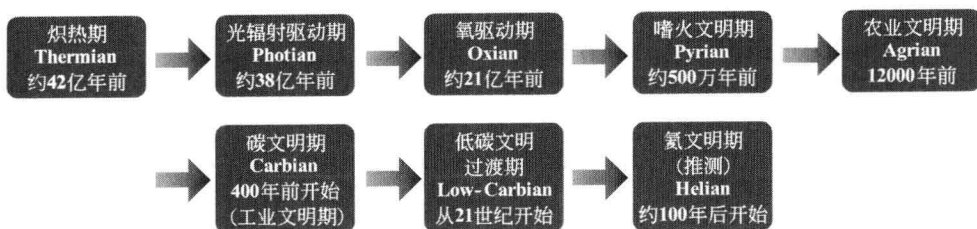


图 0-2 地球演化和人类利用能源历程^[4]

时代	能源革命	年代	体系
热核能时代		约100年后开始	热核聚变
低碳时代	氢能革命	20世纪末21世纪初开始	过渡到衍生太阳利用的部分可再生能源
碳时代	可再生能源		
	碳能利用	约400年前开始	人类开采化石能源作为主体
	农业光合作用	约12000年前开始	人类农耕方式利用太阳能
	嗜火能源	约50万年前开始	人类开始掌握火，家庭用火
光辐射时代	氧驱动过程	约21亿年前开始	生命体利用O ₂ 转化碳氢化合物获得能量
	光催化作用	约38亿年前开始	光合作用生成碳氢化合物
		约42亿年前开始	初始细胞的代谢过程
炽热期后地球初始生命			

图 0-3 地球历史上的能量利用演化^[4]

烈，能源利用效率、能量转变方式（热能、水能、电能、风能、机械能、位能等）和能量的存储方式不断进步。仅靠能量密度低的太阳光能已不能满足社会需求，这时的一次能源中化石能源占主导地位，从约 400 年前开始进入了碳文明期。

到了 20 世纪末 21 世纪初，人们已经发现完全依靠历史上数十亿年内地球存储的太阳光能，即由光合作用和地质转化形成的碳氢化合物作为一次能源是存在危机的：首先这些化石能源是有限且不可再生的，预计在数十年内石油和天然气资源即将告罄，而煤炭资源大致也只能维持约一百多年的使用；另外，大量碳的燃烧，把大量已矿化的碳元素转化为二氧化碳，排放进入大气，使大气中的 CO₂ 成分显著上升，这些气体所造成的温室效应可能增加了人类对于地球气候变化的担心。

上述两种原因在 21 世纪初引发了国际社会的疑虑，要求自觉地减少对化石能源的依赖，这样就开始了一个追求低碳文明的时期。低碳经济的主要研究内容如下。

- (1) 在生产领域节约能量使用和减少 CO₂ 排放。
- (2) 在消费过程直接或间接减少能源消耗。
- (3) 开发多种由阳光衍生的二次能源如水能、风能、地热能和潮汐能等可再生能源。
- (4) 二氧化碳等温室气体捕集、重复利用和埋藏技术。
- (5) 相应的节能减排政策法规的制定。

显然低碳文明主要的作用是延缓化石能源消耗速度，保护生态环境，以便在以化石能源为主的大约一百年内，研究开发出人类可以长远依靠的高效、高密度的能量供应来源。人类

社会最终的可预见能源可能是氢聚变能源。所以从根本上讲低碳文明或称低碳经济时代实际上是一个必不可少的过渡期，也是本书的主要讨论对象。

人类社会可以指望的最终高效能源可能是氢聚变反应所释放的能量。海水中含有的重氢（氘、氚元素）转化为氢元素可以释放大量热能，有科学家估计每升海水中所含重氢如果提炼并用于热核聚变反应，释放出的热量相当于 300L 燃油所含的热值，1kg 氘和氚的聚变反

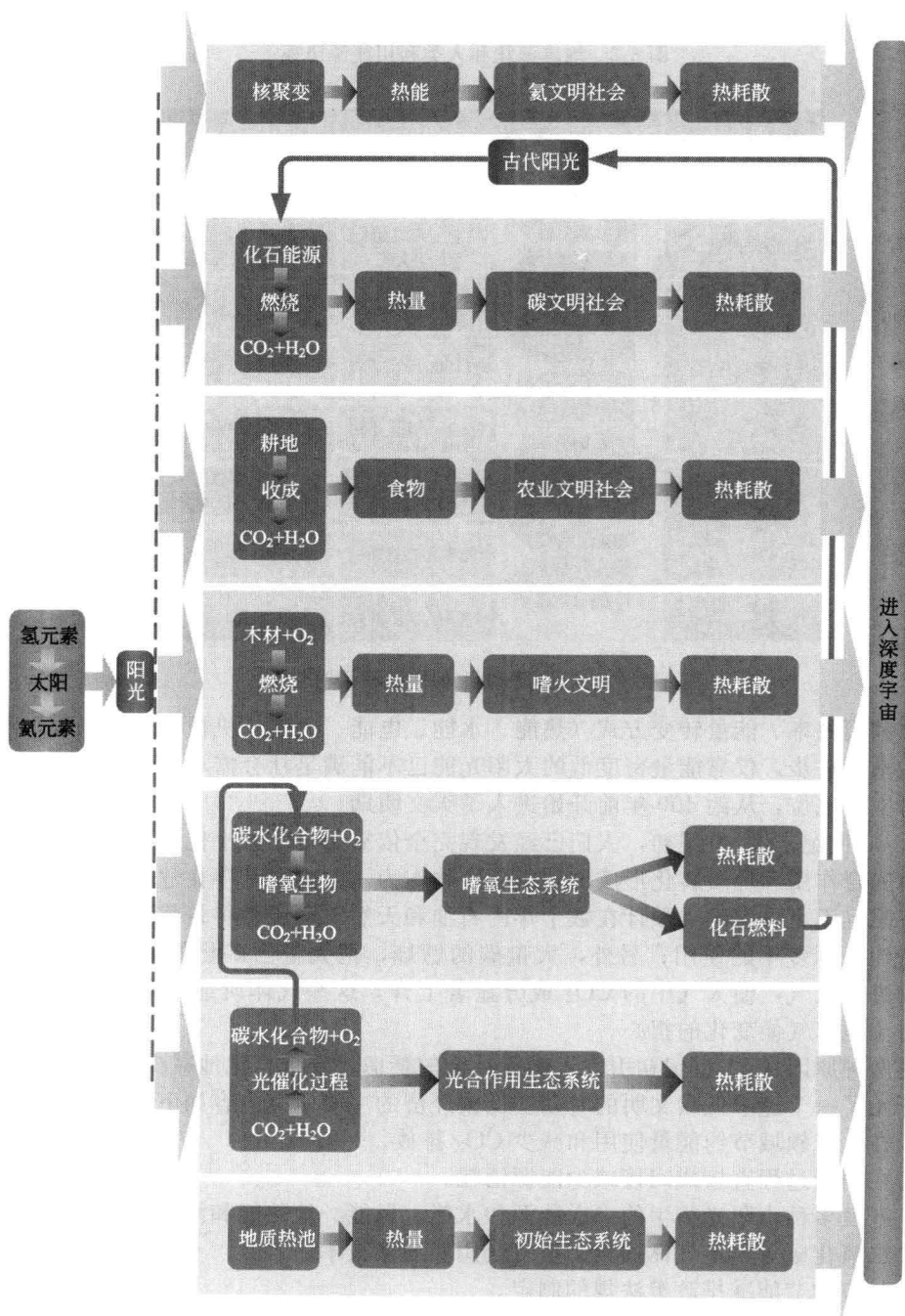


图 0-4 能量演化系统

应产生能量相当于 1.2 万吨标准煤的发热量，地球海水中氘的存量约占海水总量的 1/6500，其总热值也许可供人类使用千年、万年。但根据现今的技术水平许多科学家预计在 50 年以后热核聚变反应堆的雏形可能会推出，而要大规模成熟地使用热核能，即进入氦文明期（Helian）则可能要 100 年以后。能量演化系统参见图 0-4。

本章主要是说明低碳经济在宇宙演化到人类社会能源利用的宏观视野中所处的历史地位。

参 考 文 献

- [1] 史蒂芬·霍金. 时间简史 [M]. 许明贤译. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2010.
- [2] Stuart Clark. Unknown Earth [J]. Newscientist, 2008, (9): 28-39.
- [3] 金涌, J. Arons. 资源·能源·环境·社会——循环经济科学与工程原理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [4] Frank Niele. Energy Engine of Evolution [M]. Amsterdam/ Boston/ London/ New York: Elsevier, 2005.

第1章

CHAPTER 1

世界能源资源状况与温室气体排放总体形势

能源是国民经济可持续发展的重要物质基础，能源问题不仅关系到经济安全 and 国家安全，对生态环境也有着重大影响。一方面，近年来全球能源消费不断增长，能源供应紧张；另一方面，与能源问题密切相关的碳排放和气候变化问题日益突出。能源的可持续性供应问题越来越受到人们的关注，据英国石油公司（British Petroleum, BP）2008 年数据，依据当年产量除当年探明可采储量来计算世界及中国主要化石能源的持续供应能力，结果见表 1-1。煤炭、石油和天然气这三种主要化石能源资源未来都面临严峻的短缺问题。

表 1-1 2008 年中国和世界化石能源的储产比

单位：年

项目	煤炭	石油	天然气
中国	41	11	32
世界	122	42	60

为了确切说明能源资源量，需要明确以下两个定义。

(1) 探明可采储量 通常是指通过地质与工程信息以合理的肯定性表明，在现有的经济与作业条件下，将来可从已知储层采出的资源储量，或称为“探明经济可采储量”。

(2) 储产比 国内统称储采比，即假设将来的产量继续保持在某年度的水平，那么用该年年底的储量除以该年度的产量所得出的计算结果就是剩余可采储量的可开采年限。

本章内容分为两大部分，第一部分介绍主要能源资源的储量、分布、产量、消费量及其开发利用情况，包括煤炭、石油和天然气等常规化石能源资源；油砂、重油、油页岩、煤层气和天然气水合物等目前受到广泛关注的非常规化石能源资源；核能资源；水能资源；太阳能、风能、生物质能和海洋能等可再生资源。第二部分介绍世界一次能源消耗及碳排放的现状。