

高等学校教学用书

# 内燃机 环境保护学

● 朱崇基 周有平 王仁泉 编



浙江大学出版社

## 内 容 提 要

本书全面地论述了内燃机排污与环境保护之间的关系,深入分析了内燃机排放的有害物质和噪声的成因及其影响因素,综合叙述了当代国内外关于防治内燃机排污的净化措施与最新技术,并对内燃机排放标准、试验工况、取样方法、检测仪表和计算方法等基本内容作了较系统的介绍。

本书为高等院校汽车、拖拉机、内燃机、船舶、内燃机车及工程机械专业学生的教材和主要参考书,亦可供以上专业从事研究、设计、制造、使用等项工作的技术人员参考,对环境监测和交通管理部门也有较大的参考价值。

### 内燃机环境保护学

朱崇基 周有平 王仁泉 编

责任编辑 李桂云

浙江大学出版社出版

浙江良渚印刷厂排印

浙江省新华书店发行

开本850×1168 1/32 印张11.625 字数302千字

1988年9月第一版 1988年10月第一次印刷

印数0001—3653

ISBN 7-308-00113-X

TH·009 定价: 2.75元

# 前 言

在高等院校设置《内燃机环境保护学》选修课，是当代环境保护的需要，也是深入研究内燃机工作过程的需要。本书就是为了适应这个需要而编写的，旨在使读者认识内燃机排气污染和噪声污染对环境的危害，及防止污染保护环境的紧迫性和重要性，掌握内燃机噪声和有害排放物形成和变化的基本理论，获得防治内燃机污染的基本知识和方法，提高分析问题、解决问题的能力，为保护环境、造福子孙后代作出有益的贡献。

本书是根据作者多年来教学和科研实践所收集的大量资料写成的。第一稿写于1981年，第二稿写于1984年，经过浙江大学八届学生使用和一些院校试用，反映良好。此次出版，又根据科学技术的发展和当代环境保护对内燃机净化的要求，对全书内容作了必要的修饰、增删和提高。

本书由浙江省交通科学研究所原所长俞曾善高级工程师主审。

本书第二稿，有幸得到大连工学院内燃机研究所所长胡国栋教授和上海内燃机研究所江厚渊高级工程师的评审和鼓励；在编写过程中，又得到湖南大学段东利老师、同济大学动力教研室和许多内燃机同行的不少宝贵意见，还得到浙江大学马元骥教授的热情关怀，在此一并表示谢意。

本书内容广泛，涉及许多学科和科技领域，限于作者水平，书中错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

作者 1987.10.

# 目 录

|                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>第一章 绪 论</b> .....                                                                                                            | 1  |
| 1.1 我国环境保护的方针和原则 .....                                                                                                          | 1  |
| 1.2 生态平衡与环境污染 .....                                                                                                             | 2  |
| 1.2.1 人类与环境 1.2.2 生态系统 1.2.3 主要物质<br>循环 1.2.4 自然界的调节与净化功能 1.2.5 环境污<br>染与破坏                                                     |    |
| 1.3 内燃机污染与危害 .....                                                                                                              | 10 |
| 1.3.1 内燃机污染的主要表现 1.3.2 内燃机排气组成<br>与有害物质 1.3.3 污染物计量单位 1.3.4 主要有害<br>成分的危害                                                       |    |
| 1.4 本课程的任务 .....                                                                                                                | 18 |
| 思考题 .....                                                                                                                       | 19 |
| <b>第二章 大气污染与汽车公害</b> .....                                                                                                      | 21 |
| 2.1 大气污染 .....                                                                                                                  | 21 |
| 2.1.1 大气污染的含义 2.1.2 大气的正常组分与污染<br>物质 2.1.3 大气净化的尺度与质量标准 2.1.4 大气<br>污染的来源 2.1.5 严重大气污染事件 2.1.6 对流层<br>逆温现象与大气污染 2.1.7 二氧化碳的温室效应 |    |
| 2.2 光化学烟雾形成机理 .....                                                                                                             | 31 |
| 2.2.1 光化学烟雾的组成与产生条件 2.2.2 哈根·斯<br>密特臭氧形成理论 2.2.3 卡普兰反应图形<br>2.2.4 烟雾室模拟 试验                                                      |    |
| 2.3 汽车排气公害 .....                                                                                                                | 36 |
| 2.3.1 汽车排气公害的严重性 2.3.2 我国汽车排放现                                                                                                  |    |

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| 状及其对大气的影响                                                       |    |
| 2.4 汽车和内燃机排放标准 .....                                            | 41 |
| 2.4.1 汽车怠速排放标准 2.4.2 汽车行驶排放标准                                   |    |
| 2.4.3 汽车蒸发物排放标准 2.4.4 车用柴油机烟度排<br>放标准 2.4.5 矿井和地下作业用柴油机排放标准     |    |
| 思考题 .....                                                       | 49 |
| <b>第三章 城市环境噪声与交通噪声</b> .....                                    | 51 |
| 3.1 噪声的性质、来源与分类 .....                                           | 51 |
| 3.1.1 噪声的定义与性质 3.1.2 噪声的来源与分类                                   |    |
| 3.2 与噪声有关的声学基本知识 .....                                          | 52 |
| 3.2.1 声场的类型 3.2.2 声压级, 声强级, 声功率级                                |    |
| 3.2.3 噪声级计算 3.2.4 噪声的频谱与分析                                      |    |
| 3.3 评价环境噪声的基本方法 .....                                           | 58 |
| 3.3.1 响度级 3.3.2 计权声级和A声级 3.3.3 统计<br>声级 3.3.4 等效声级 3.3.5 交通噪声指数 |    |
| 3.4 噪声的危害与控制标准 .....                                            | 61 |
| 3.4.1 噪声的危害 3.4.2 环境噪声容许标准                                      |    |
| 3.5 城市环境噪声与交通噪声 .....                                           | 66 |
| 3.5.1 我国城市环境噪声水平 3.5.2 交通噪声<br>3.5.3 汽车噪声                       |    |
| 思考题 .....                                                       | 75 |
| <b>第四章 内燃机噪声与控制</b> .....                                       | 77 |
| 4.1 内燃机噪声分类 .....                                               | 77 |
| 4.2 燃烧噪声 .....                                                  | 79 |
| 4.2.1 燃烧噪声的形成 4.2.2 燃烧噪声的影响因素                                   |    |
| 4.3 机械噪声 .....                                                  | 85 |
| 4.3.1 机械噪声的形成 4.3.2 机械噪声的影响因素                                   |    |

|            |                                              |           |
|------------|----------------------------------------------|-----------|
| 4.4        | 气体动力噪声 .....                                 | 87        |
| 4.4.1      | 进气噪声                                         |           |
| 4.4.2      | 排气噪声                                         |           |
| 4.4.3      | 冷却风扇噪声                                       |           |
| 4.4.4      | 废气涡轮增压器噪声                                    |           |
| 4.5        | 内燃机噪声的估算 .....                               | 93        |
| 4.6        | 内燃机噪声的控制 .....                               | 93        |
| 4.6.1      | 对气体动力噪声的控制                                   |           |
| 4.6.2      | 对燃烧噪声的控制                                     |           |
| 4.6.3      | 对机械噪声的控制                                     |           |
| 思考题        | .....                                        | 95        |
| <b>第五章</b> | <b>汽油机排气污染 .....</b>                         | <b>96</b> |
| 5.1        | 概述 .....                                     | 96        |
| 5.2        | 化学平衡时燃烧产物各组分的求法 .....                        | 99        |
| 5.3        | 一氧化碳的生成机理与影响因素 .....                         | 103       |
| 5.3.1      | 表观理论分析                                       |           |
| 5.3.2      | $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ 的高温离解反应 |           |
| 5.3.3      | 化学动力学浓度冻结现象对CO 消失反应的限制                       |           |
| 5.3.4      | 影响CO 排放的因素                                   |           |
| 5.4        | 未燃烃生成机理与影响因素 .....                           | 113       |
| 5.4.1      | 未燃烃生成机理                                      |           |
| 5.4.2      | 影响未燃烃排放的运行因素                                 |           |
| 5.4.3      | 燃烧室面容比及与其有关的结构因素对未燃烃排放的影响                    |           |
| 5.5        | 氮氧化物的生成机理与影响因素 .....                         | 127       |
| 5.5.1      | 捷尔杜维奇链反应                                     |           |
| 5.5.2      | NO 的平衡浓度                                     |           |
| 5.5.3      | 非平衡过程                                        |           |
| 5.5.4      | NO 的分解                                       |           |
| 5.5.5      | 影响NO 生成的因素                                   |           |
| 5.6        | 发动机的典型排放特性 .....                             | 139       |
| 5.6.1      | 等速排放特性                                       |           |
| 5.6.2      | 负荷排放特性                                       |           |
| 5.6.3      | 运转工况排放特性                                     |           |
| 思考题        | .....                                        | 143       |

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>第六章 柴油机排气污染</b>                                                              | 145 |
| 6.1 概述                                                                          | 145 |
| 6.2 直喷式柴油机有害排放物的生成机理                                                            | 148 |
| 6.2.1 燃油喷注 6.2.2 燃油喷注分区模型 6.2.3 喷注中有害排放物的生成                                     |     |
| 6.3 直喷式柴油机有害气体排放物的浓度变化与影响因素                                                     | 154 |
| 6.3.1 未燃烃 6.3.2 一氧化碳 6.3.3 氮氧化物 6.3.4 其他有害排放物                                   |     |
| 6.4 球形油膜燃烧系统的工作特点与排放性能                                                          | 176 |
| 6.5 非直喷式柴油机的排放性能与主要影响因素                                                         | 177 |
| 6.6 柴油机颗粒排放                                                                     | 182 |
| 6.6.1 概述 6.6.2 排气颗粒的组成与特征 6.6.3 柴油机颗粒生成机理 6.6.4 影响颗粒排放的主要因素                     |     |
| 思考题                                                                             | 196 |
| <b>第七章 内燃机排气净化措施</b>                                                            | 198 |
| 7.1 概述                                                                          | 198 |
| 7.1.1 前处理净化 7.1.2 机内净化 7.1.3 后处理净化                                              |     |
| 7.2 废气再循环                                                                       | 203 |
| 7.2.1 作用及基本原理 7.2.2 EGR率计算公式 7.2.3 控制要求 7.2.4 EGR系统的基本类型 7.2.5 EGR率对内燃机净化与性能的影响 |     |
| 7.3 燃油掺水                                                                        | 212 |

|                       |                        |     |
|-----------------------|------------------------|-----|
| 7.3.1 掺水方法与净化原理       | 7.3.2 乳化燃料的净化特性与节油效果   |     |
| 7.4 分层充气燃烧系统          |                        | 219 |
| 7.4.1 研制情况            | 7.4.2 分层充气燃烧的基本设想      |     |
| 7.4.3 分层充气燃烧系统的基本类型   | 7.4.4 分层充气燃烧系统的排放特性    |     |
| 7.5 均质稀燃技术            |                        | 229 |
| 7.5.1 丰田扰流发生罐方式       | 7.5.2 日产双火花塞急速燃烧方式     |     |
| 7.5.3 三菱的喷射阀方式        | 7.5.4 东洋的SCS方式         |     |
| 7.6 汽油喷射              |                        | 235 |
| 7.7 改善化油作用, 精确控制空燃比   |                        | 239 |
| 7.7.1 起动和冷态运转时混合气控制   | 7.7.2 怠速时混合气控制         |     |
| 7.7.3 减速时混合气控制        | 7.7.4 进行EGR时的混合气控制     |     |
| 7.7.5 提高和改进化油器产品质量    | 7.7.6 采用新式化油器          |     |
| 7.8 改进汽油机点火系统         |                        | 245 |
| 7.8.1 对点火系统性能参数实现最佳调节 | 7.8.2 改革现用的点火系统        |     |
| 7.8.3 电子点火系统的新贡献      |                        |     |
| 7.9 其他机内净化措施          |                        | 247 |
| 7.9.1 改进柴油机燃烧系统       | 7.9.2 柴油机采用预喷射法        |     |
| 7.9.3 扩大直喷式柴油机燃烧室直径   | 7.9.4 缩小汽油机挤气间隙区       |     |
| 7.9.5 合理选用发动机常用工况     |                        |     |
| 7.10 排气后处理            |                        | 252 |
| 7.10.1 空气喷射           | 7.10.2 热反应器            |     |
| 7.10.3 氧化催化反应器        | 7.10.4 还原催化反应器和三元催化反应器 |     |
| 7.10.5 碳烟颗粒净化装置       |                        |     |
| 7.11 防止燃油蒸发排放的措施      |                        | 263 |
| 7.12 车用内燃机排气净化的前景与展望  |                        | 265 |
| 思考题                   |                        | 267 |



## 第八章 其他内燃机的排气污染与净化途径..... 269

### 8.1 液化石油气发动机 ..... 269

8.1.1 液化石油气的理化特性 8.1.2 液化石油气发动机低污染的原因与存在问题 8.1.3 液化石油气发动机的排放特性与净化途径

### 8.2 氢发动机 ..... 271

8.2.1 氢发动机的燃烧特性 8.2.2 氢发动机的排放特性与净化方法 8.2.3 日本武藏工业大学的复合燃烧系统 8.2.4 汽油、氢气混合燃烧的新尝试

### 8.3 三角旋转活塞式汽油机 ..... 276

8.3.1 转子机的原始排放特性 8.3.2 影响排放性能的主要因素 8.3.3 怠速和低负荷排放性能分析 8.3.4 减少排污的方法与措施 8.3.5 转子机的分层充气燃烧系统

### 8.4 甲醇发动机 ..... 288

8.4.1 甲醇的理化特性 8.4.2 甲醇发动机工作方式与净化性能

### 8.5 燃气轮机 ..... 290

### 思考题..... 293

## 第九章 内燃机排污的监测技术..... 295

### 9.1 排气成分测定的试验工况 ..... 295

9.1.1 汽车怠速试验规范 9.1.2 汽车行驶试验规范 9.1.3 柴油机烟度测定试验工况 9.1.4 燃料蒸发排放测定工况

### 9.2 排气分析的取样方法 ..... 309

9.2.1 直接取样法 9.2.2 全量取样法 9.2.3 比例取样法 9.2.4 定容取样法

### 9.3 排气成分分析仪 ..... 317

|       |             |       |          |             |
|-------|-------------|-------|----------|-------------|
| 9.3.1 | NDIR分析仪     | 9.3.2 | FID检测器   |             |
| 9.3.3 | CLD测试仪      | 9.3.4 | 气相色谱分析装置 |             |
| 9.3.5 | 激光光声光谱仪     |       |          |             |
| 9.4   | 烟度测定方法与仪表   |       |          | 329         |
| 9.4.1 | 波许式烟度计      | 9.4.2 | 哈特立奇式烟度计 |             |
| 9.4.3 | 冯布兰德式烟度计    | 9.4.4 | 林格曼比色法   |             |
| 9.4.5 | PHS式烟度计     | 9.4.6 | 重量式烟度计   |             |
| 9.5   | 噪声测量仪       |       |          | 334         |
| 9.5.1 | 声级计         | 9.5.2 | 频率分析仪    | 9.5.3 噪声记录仪 |
| 9.6   | 排气成分计算      |       |          | 337         |
|       | 思考题         |       |          | 343         |
| 附录1   | 国外汽车排放标准    |       |          | 346         |
| 附录2   | 国外柴油机烟度排放标准 |       |          | 355         |
| 附录3   | 国外汽车噪声标准    |       |          | 357         |

# 第一章 绪 论

## 1.1 我国环境保护的方针和原则

当前，环境保护已成为人们日益关心的重大问题。我国是发展中的社会主义国家，党和政府一贯重视环境保护工作，早在1972年就制定了“全面规划，合理布局，综合利用，化害为利，依靠群众，大家动手，保护环境，造福人民”的方针。1978年全国五届人大第一次会议通过的《中华人民共和国宪法》，又进一步作了关于“国家保护环境和自然资源，防治污染和其他公害”的规定，并于1979年据此制定和颁布了《中华人民共和国环境保护法》（试行）。

我国环境保护法的颁布，标志着我国环境保护工作已进入法制的新阶段。我国环境保护法重申了上面提到的方针，并明确规定：“国务院和所属各部门、地方各级人民政府必须切实做好环境保护工作；在制定发展国民经济计划的时候，必须对环境的保护和改善统筹安排，并认真组织实施；对已经造成的环境污染和其它公害，必须作出规划，有计划有步骤地加以解决。”这项规定把环境保护纳入国家计划和经济管理的轨道，使国民经济发展和环境保护统一起来，对我国社会主义经济和环境保护工作的健康发展具有决定性意义。我国环境保护法还规定在环保工作中执行奖励与惩罚相结合的政策，对实行综合利用、化害为利的工矿企业给予奖励，对违反环境保护法造成环境污染和破坏的要追究行政责任、经济责任，直至依法追究刑事责任。这项法律制度，对于预防和治理环境污染起了促进作用。

我国为了建立一套完整的环境保护法体系，继《中华人民共和国环境保护法》之后，1982年8月正式颁布了我国《大气环境质量标准》，有关的各项具体环境法规也已制定或正在积极制定

之中，同时还建立和健全了各省、市的监测、监督、检查和执法机构，从而把我国环境保护工作推到一个新的高度。

1983年底，国务院召开了全国环境保护会议。这次会议奠定了中国环境保护的发展战略，其主要精神是在国家计划的指导下，坚持经济建设、城乡建设和环境保护的同步规划、同步实施和同步发展，实现经济效益、社会效益和环境效益的统一。这次会议确定的环境保护的战略目标是：到2000年，全国的环境污染和生态破坏问题基本得到解决，力争使城乡人民的生产和生活环境达到清洁和优美的程度，各种自然生态恢复到良好的状态，基本达到与人民物质、文化生活相适应的水平。我国环境保护工作指导思想上的重大转变，从宏观上理顺了经济建设与环境保护的相互关系，在社会主义现代化建设中给环境保护增添了新的活力。

## **1.2 生态平衡与环境污染**

### **1.2.1 人类与环境**

环境保护学所指的环境就是人类的生存环境，是“大气、水、土地、矿藏、森林、草原、野生动物、野生植物、水生生物、名胜古迹、风景游览区、温泉、疗养区、自然保护区、生活居住区等”<sup>①</sup>作用于人类的所有外界事物的总称。

自然环境与上述环境有所区别，它是自然界所固有的环境，亦即单纯地由空气、日光、水、温度、土壤、岩石等自然因素构成的环境。自然环境是包括人类在内的一切生物赖以生存和发展的物质基础。在环境科学研究生物与环境相互关系时所指的环境，则是针对自然环境而言的。

人类与自然环境的对立统一关系，且人类是主导因素，在处理这一关系中占居着支配地位。人能以自己的劳动来改造环境，使之转变为新的生存环境。反过来，环境也会作用于人类，对人类的生产和消费活动起着适应、制约甚至是报复的作用。然

<sup>①</sup> 见《中华人民共和国环境保护法》关于环境的规定。

而，这种改造与反作用，总的说来是能够协调的。自然界是不断变化的，人总能通过自身的调节功能来适应环境的变化，即使在自然环境对人类报复时，人类也能从中吸取经验教训，用科学的方法来治理环境，使之适应人类的生存。

### 1.2.2 生态系统

人类在改造环境过程中，由于主观要求与自然环境的客观发展规律之间不一致，有时也会带来消极结果。人类对自然资源的不合理开发利用和工农业生产对环境造成的污染，严重地影响了某些生物种类的正常生长和繁殖，并已直接或间接地危及到人类本身，出现了人为的环境问题。因此，科学家在论及环境污染时常常和生态系统的平衡受到破坏联系起来，在研究环境保护问题时常常提到生态学方面的问题。

生态学是研究生物与其生存环境之间相互关系的一门学科。生态系统是生态学研究的基本内容。生态系统是生物与环境的综合体，是指自然界一定空间的不同营养级生物与环境间相互作用、相互制约、不断演变，通过物质循环和能量交换而达到动态平衡和相对稳定的统一整体，是具有特定结构和功能的系统。

生态系统在自然界中的规模有大有小，大至地球上所有生物都在其中生活的整个生物圈，在生物圈内部又包含着无数个大大小小的生态系统，甚至小到一片山林、一个池塘。每一个小的生态系统是自然界的基本活动单元。

生态系统的类型多种多样，就生态类型来说，有淡水生态系统、海洋生态系统和陆地生态系统等；按人为影响来分，有自然生态系统、半自然生态系统、人工生态系统等。无论多么小的生态系统，也无论什么样的生态系统，都有如图1-1所示的基本结构和功能。

生态系统由生产者、消费者、分解者和无生命物质（营养库）四个部分构成一个有机的统一整体，相互之间沿着各组分之

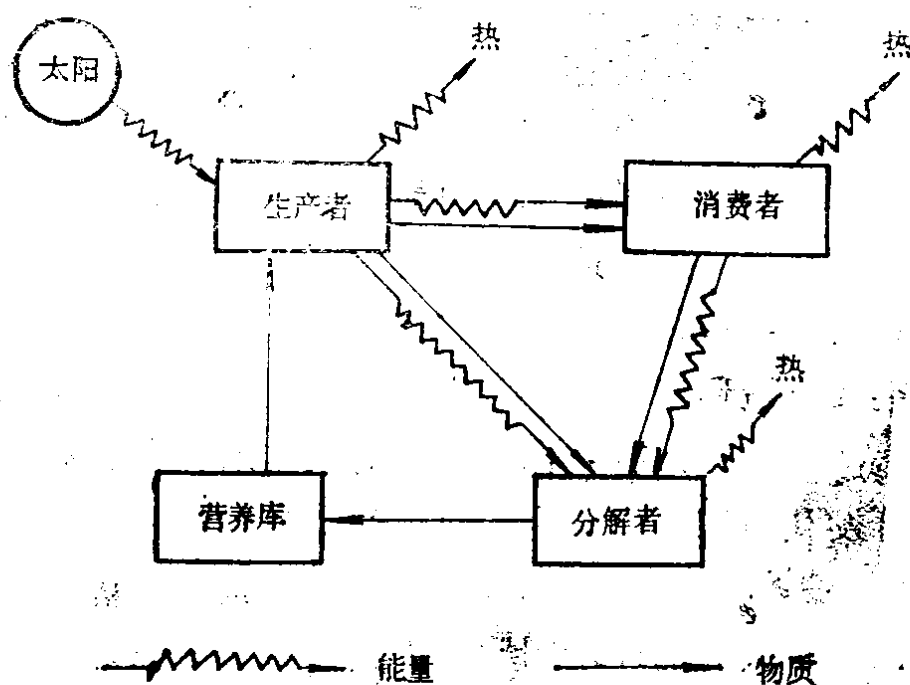


图 1-1 生态系统基本结构和功能

间的营养关系和各生物之间的食物链关系所确立的途径，不断地进行着物质与能量的交换。

物质循环和能量交换是一切生命存在的基本条件。太阳能是生态系统中进行能量交换的根本能源。能量在生态系统中的流动不是封闭的循环运动，而是一种由集中到分散、由高位到低位的单向传递过程。在传递过程中只有一部分能量为生物用来作为运动和生长的动力，相当多的能量则以无用的热量形式散失掉。而构成水、大气、各种无机物和有机物的无生命营养物质在生态系统中的流动是一种循环运动，它们在任何情况下都没有减少，只是反复地循环和再循环。

生产者主要为含叶绿素植物，它通过光合作用变无机物为有机物（淀粉），将太阳能转化为化学能，除供给自身生长需要外，还以食物和能量的形式供给人类及其他生物类群所需。但是，绿色植物的生产效率有限。据介绍，在约 1 平方米的叶片上，如一天投射的辐射能为 12 560 千焦，其中约有一半作为辐射热而散失，剩下的一半虽可供利用，但真正以淀粉等有机物质将能量固

定下来的只占1%。全世界绿色植物通过光合作用制造的有机物质每年可达1 500~2 000亿吨。

消费者，主要是动物。草食动物是以植物固定的潜能为食物而维持生命的消费者群体，叫做一级消费者；一级肉食动物是以草食动物为食物的消费者群体，叫做二级消费者；二级肉食动物是以一级肉食动物为食物的消费者群体，叫做三级消费者；……。其中植物所固定的能量，只有10%为草食动物所利用；草食动物所固定的能量，也只有10%为一级肉食动物所利用；……。自然界各营养级之间能量转移的效率一般为10%，故有“10%规律”之说。能量就是通过各种营养级组成的食物链的一系列活动进行转移的。显然，低位营养级的生物数量的增减，必使高位营养级生物数量受到影响；反之，高位营养生物数量的增减，也使低位营养生物数量受到影响，这就是著名的食物链反馈机理。

分解者，主要指各种有分解能力的微生物。它既可将消费者的排泄物或尸体分解成简单的可溶性化合物和元素，也能将某些已死亡的绿色植物的腐败物进行分解。在分解时释放的化学能被分解者用以维持生命，释放的营养物质则被送到大自然的营养库中，以完成物质循环。

### 1.2.3 主要物质循环

自然界每个生态系统都有其自身的物质循环。地球上的物质，都通过生态系统经常保持着循环。由于自然界里最基本的元素是碳、氢、氧、氮、磷、硫等，包括人类在内的一切生物也主要是由这些元素构成的，因此生态系统中最主要的物质循环也就是这些物质的循环，其中水循环、碳循环和氮循环与环境污染关系较为密切。图1-2、1-3、1-4分别为碳循环、氮循环和水循环的示意图。

观察物质在生态系统的各个组分之间如何进行转移，可以深入了解物质循环对于生物生存和发展的重要性。水的循环过程对

于生命活动和净化环境的重要性，早已为人们所了解，这里就不多说了。下面结合前述生态系统的基本结构模式，对碳、氮物质的循环过程作一些简要介绍：

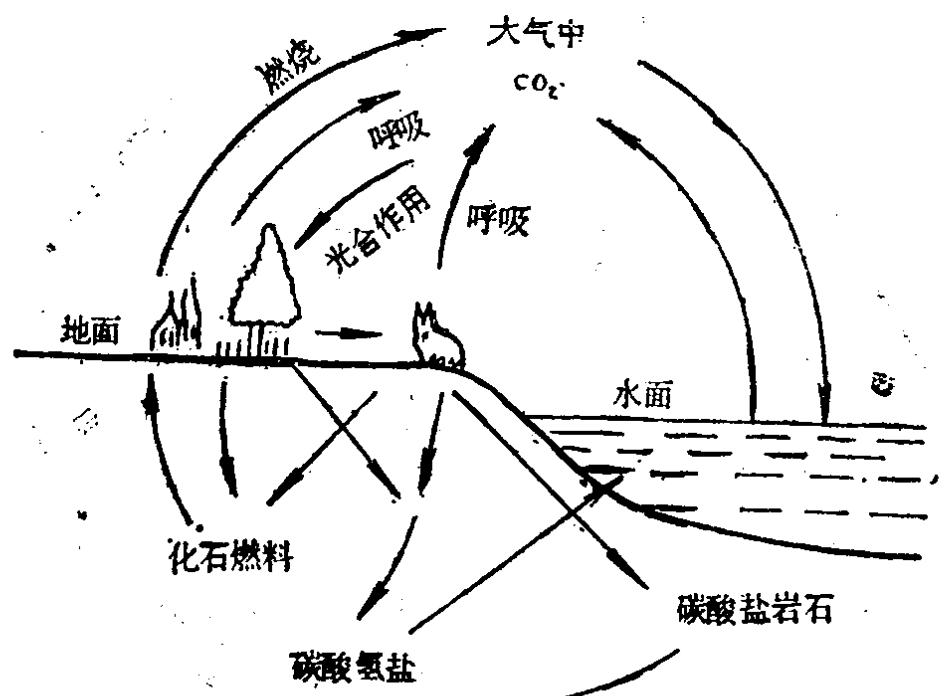


图 1-2 碳循环

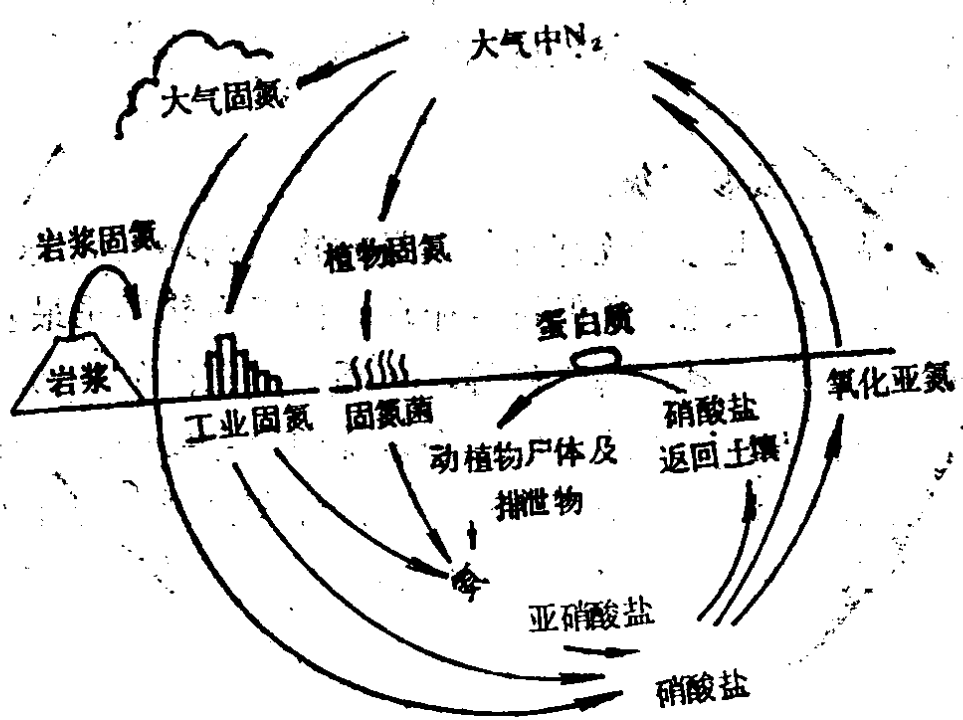


图 1-3 氮循环



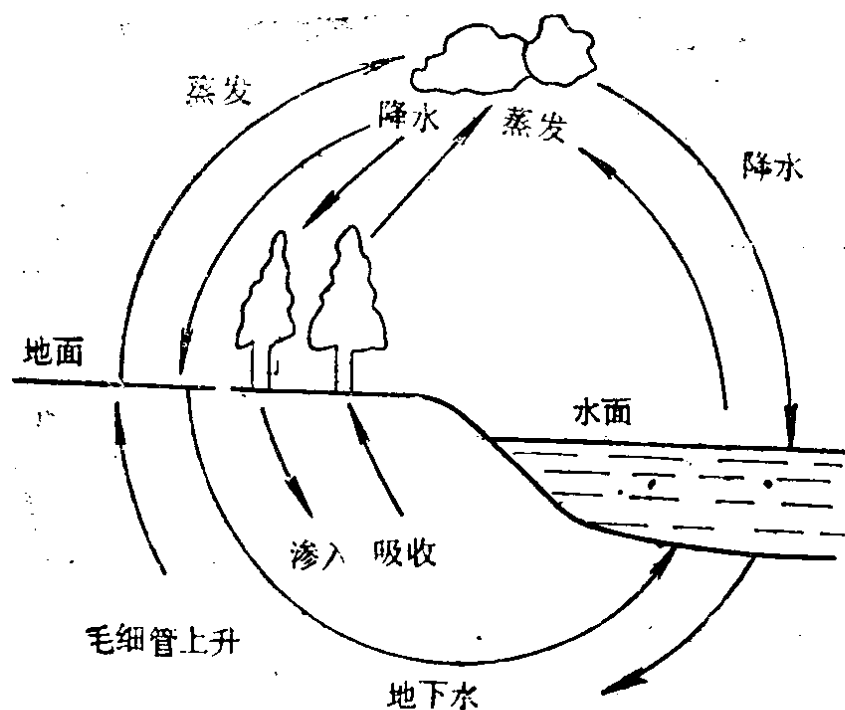


图 1-4 水循环

植物以太阳能作为能源进行光合作用时，将根部吸收的水分和从大气吸收的 $\text{CO}_2$ ，通过叶绿素的催化作用合成淀粉 $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ ，并以叶片和枝干的成长形态贮藏起来，而在光合过程中产生的 $\text{O}_2$ 直接释放到大气之中。这样，大气中以 $\text{CO}_2$ 形态存在的C，便通过光合作用转移到植物体内。接着，在食物链的下一阶段，当草食动物向植物摄取淀粉时，大气中的C又经植物转移到草食动物体内，然后又进一步转移到肉食动物体内，进而变为排泄物和尸体为微生物所分解，最后重新变为 $\text{CO}_2$ 返回大气之中。另外，由绿色植物衍变而成的化石燃料，经过燃烧，也会向大气释放 $\text{CO}_2$ ，以完成碳循环。

植物还能利用淀粉和 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 以及含氮的无机盐，进一步制成脂肪和蛋白质等有机物质。其中含氮的无机盐来自土壤，它主要是由大气中的 $\text{N}_2$ 经微生物分解、雷电电离或人工合成的。豆科植物和少数高等植物也能通过根瘤菌固定大气中的 $\text{N}_2$ 。这样，氮元素便由大气经土壤以蛋白质形态转移到植物的种子内。同样，通过食物链的作用，氮元素又依次转移到草食动物和肉食