绪　论

一、环境的概念

1. 人类与环境

环境(environment)是指以某一中心事物为主体的外部世界。对人类来说，环境是指人类赖以生存和发展的物质条件的整体，包括自然环境(natural environment)和人工环境(artificial environment).

自然环境是人类出现之前就存在的，是人类目前赖以生存所必需的自然条件和自然资源的总称,即阳光、温度、气候、空气、水、地磁、岩石、土壤、动植物、微生物以及地壳的稳定性等自然因素的总和，也是“直接或间接地影响到人类的一切自然形成的物质、能量和自然现象的总体”。人工环境是指由于人类的活动而形成的环境要素，即由人工形成的物质、能量和精神产品，以及人类活动中所形成的人与人之间的关系——上层建筑。人工环境可分为工程环境和社会环境。

《中华人民共和国环境保护法》指出“本法所称环境是指大气、水、土地、矿藏、森林、草原、野生动物、野生植物、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。”可见，环境法中的环境概念不如一般意义上的环境概念广泛，但比其明确，它是为便于实施而作的具体规定，是环境概念的具体化。

2. 环境要素

环境要素(environmental element)是指构成人类环境整体的各个相对独立、性质不同、对人类有决定性影响的基本因素，分为自然环境要素和人工环境要素。自然环境要素通常指：大气、水、土壤、生物、阳光、岩石等。人工环境要素包括人口、人权、政治、文化等。

环境要素具有一些十分重要的特性。这些特性不仅是制约各环境要素间互相联系、互相作用的基本关系，而且是认识环境、评价环境、改造环境的基本依据。环境要素的特性有：

(1)最差(小)限制律,这是针对环境质量而言的。该定律指出“整体环境的质量,不能由环境诸要素的平均状态决定，而是受环境诸要素中那个与最优状态差距最大的要素所控制。”这就是说，环境质量的好坏，取决于诸要素中处于“最低状态”的那个要素，不能用其余的处于优良状态的环境要素去弥补。因此，在改造自然和改善环境质量时，必须对环境诸要素的优劣状态进行分类，按由差到优的顺序，依次改造每个要素，使之均衡地达到最佳状态。

(2)等值性。即各个环境要素，无论它们本身在规模上或数量上如何不同，但只要是一个独立的要素，那么对于环境质量的限制作用并无质的差异。

(3)整体性大于各个体之和，或者说环境的整体性大于环境诸要素之和。即某一环境的性质不等于组成该环境各个要素性质之和，而是比这种“和”丰富得多，复杂得多。环境诸要素互相联系、互相作用产生的集体效应，是个体效应基础上的质的飞跃。

(4)出现先后，互相联系，互相依赖。环境诸要素在地球演化史上的出现，具有先后之别，但它们又是相互联系，相互依赖的，即从演化的意义上看，某些要素孕育着其他要素。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

3. 环境的分类

人类环境由若干个规模大小不同、复杂程度有别、等级高低有序、彼此交错重叠、彼此互相转化变换的子系统组成，是一个具有程序性和层次结构的网络。人们可以从不同的角度或以不同的原则，按照人类环境的组成和结构关系将它进行不同的分类。通常的分类原则是：环境范围的大小、环境的主体、环境的要素、人类对环境的作用以及环境的功能等。按环境的范围，由近及远可分为：

(1) 聚落环境(settlement environment)

聚落是人类聚居的地方与活动的中心。它可分为院落环境、村落环境和城市环境。

(2) 地理环境(geographical environment)

地理环境是围绕人类的自然现象及人文现象的总体，分自然地理环境和人文地理环境。自然地理环境位于地球的表层，即由岩石圈、水圈、土壤圈、大气圈和生物圈组成的相互制约、相互渗透、相互转化的交错带，其厚度约 10～30 km 。人文地理环境是指人类的社会、文化、生产、生活活动的地域组合，包括人口、民族、聚落、政治、社团、经济、交通、军事、社会行为等许多成分。它们在地球表面构成的圈层，称为人文圈或社会圈、智慧圈、技术圈。自然地理环境是自然地理物质发展的产物，人文地理环境是人类在前者的基础上进行社会、文化和生产活动的结果。因此，从大的范围来说，地理环境，特别是自然地理环境是环境科学的重点研究对象。

(3) 地质环境(geological environment)

简单地说，它是指自然地理环境中除生物圈以外的部分。它能为人类提供丰富的矿物资源。

(4) 宇宙环境(cosmic environment)

环境科学中宇宙环境是指地球大气圈以外的环境，又称星际环境。不过，此处所指的宇宙环境仅限于人类进入太空活动以后，人和飞行器（人造卫星、探测器、航天飞机等）在太阳系内飞行触及的环境。

毫无疑问，任何一个层次的环境系统，都由低一级层次的各个子系统组成，而它自身又是更高级环境系统的组成部分。

4. 环境的功能特性

环境系统(environmental system)是一个复杂的有时、空、量、序变化的动态系统和开放系统。系统内外存在着物质和能量的变化和交换。在一定的时空尺度内，若系统的输入等于输出，就出现平衡，叫做环境平衡或生态平衡(ecological balance)。

系统的组成和结构越复杂，它的稳定性越大，越容易保持平衡；反之，系统越简单，稳定性越小，越不容易保持平衡。因为任何一个系统，除组成成分的特征外，各成分之间还具有相互作用的机制。这种相互作用越复杂，彼此的调节能力就越强；反之则弱。

环境系统的特性包括：

(1)整 体 性

整体性是指环境各部分之间存在着紧密的相互联系和相互制约的关系。局部地区的环境污染或破坏，总会对其他地区造成影响和危害。所以人类的生存环境及其保护，从整体上说是没有地区界线或国界的。

(2) 有限性

有限性是指地球的空间有限、环境的稳定性有限、资源有限、容纳污染物的能力有限或对污染物的自净能力有限。

(3)不可逆性

人类的环境系统在其运转过程中存在两个过程：能量流动和物质循环。后一过程是可逆的，但前一过程不可逆。因此根据热力学理论，整个过程是不可逆的。所以环境一旦遭到破坏，靠环境自身不能完全回到原来的状态。一般说来，小范围的环境破坏在人工帮助下可恢复其原有的生态功能，大范围的环境破坏如全球变暖、臭氧层破坏是很难恢复的，甚至在现有技术条件下是无法恢复的。

(4)隐 显 性

除了事故性的污染与破坏（如森林大火、农药厂事故等）可直观其后果外，日常的环境污染与环境破坏对人们的影响，需要经过一定的过程和时间后其后果才显现。如日本汞污染引起的水俣病,经过 20 年才显现出来。

(5)持续反应性

事实告诉人们，环境污染不但影响当代人的健康，而且还会造成世世代代的遗传隐患。历史上黄河流域生态环境的破坏，至今仍给炎黄子孙带来无尽的水旱灾害。

(6)灾害放大性

实践证明，某方面不引人注目的环境污染与破坏，经过环境的作用以后，其危害性或灾害性无论从深度和广度，都会明显地放大。如温室气体的过量排放不仅会造成局部地区空气污染，还可能造成酸沉降，毁坏大片森林，大量湖泊不宜鱼类生存，而且还因温室效应，使全球气候异常,气温升高,冰帽溶化,海水上涨,淹没大片陆地。

5. 环境问题

根据范围大小不同，环境问题(environmental problem）可从广义和狭义两个方面去理解。广义上，环境问题就是由自然力或人力引起的生态平衡破坏，最后直接或间接地影响到人类的生存和发展的一切客观存在的问题；狭义上，环境问题是由于人类的生产和生活活动，使自然生态系统失去平衡，反过来影响到人类生存和发展的一切问题。

从引起环境问题的根源考虑，可将环境问题分为两类。由自然力引起的环境问题为原生环境问题，又称第一环境问题，它主要是指地震、洪涝、干旱、滑坡等自然灾害问题。对于这类环境问题，目前人类的抵御能力还很薄弱。由人类活动引起的环境问题为次生环境问题，又叫第二环境问题，它又可分为环境污染（包括化学性的及物理性的）和环境破坏（又称生态破坏）两类。

环境问题是伴随着人类的出现、生产力的发展和文明程度的提高而产生的，并由小范围、低危害向大范围、高危害方向发展。依据环境问题产生的先后和轻重程度，环境问题的发生与发展，大致可分为三个阶段。

(1)早期环境问题阶段

此阶段从人类出现直至产业革命的漫长时期。

在原始社会中，由于过度的采集和狩猎，往往是消灭了居住地区的许多物种，破坏了人们的食物来源，使人们失去了进一步获得食物的可能性，从而使人类的生存受到威胁，这是人类活动产生的最早的环境问题。但由于当时生产力水平极低，人类很少有意识地改造环境。因此环境问题并不突出，而且很容易被自然生态系统自身的调节能力所弥补。

到了奴隶社会和封建社会时期，出现了耕作业和鱼牧业的劳动分工。为了发展农业和畜牧业，人们砍伐和焚烧森林，开垦土地和草原，把焚烧山林的草木灰作为土地的肥料，导致土壤破坏，出现严重的水土流失(soil and water loss)，使肥沃的土地变成不毛之地,出现以土地破坏

为特征的人类的第二个环境问题。

我国的黄河流域，四千多年前是森林茂密、水草丰富的森林草原带。森林覆盖率达 53%。在农业生产中，由于盲目开发，森林被破坏了，致使今天这里 43 万 km^2 的土地变成千沟万壑，水土流失严重，呈现出荒山秃岭、茫茫荒原的景象。

(2)近代环境问题阶段

此阶段从产业革命到 1984 年发现南极臭氧层空洞前为止。

此阶段中人们极度地挖掘自然资源，破坏生态环境，造成了严重环境污染（environmental 问lution）现象，如大气污染、水体污染、土壤污染、噪声污染、农药污染和核污染等。震惊世界的 8 大公害事件,就是在 20 世纪中后期发生的。这一时期环境污染的特点是：由工业污染向城市污染和农业污染发展 由点源污染向面源(江、河、湖、海)污染发展 由局部污染向区域性和全球性污染发展，构成了世界上第一次环境问题高潮。

(3)现代环境问题阶段

此阶段从 1984 年发现南极臭氧层空洞开始至今。

这一阶段环境问题的核心,是与人类生存休戚相关的‘全球变暖’、‘臭氧层破坏’和‘酸沉降”三大全球性大气环境问题，从而构成了第二次环境问题高潮，并引起各国政府和全人类的高度重视。

环境问题是随着经济和社会的发展而产生和发展的；老的环境问题解决了，又会出现新的环境问题。人类与环境这一对矛盾，是不断运动、不断变化、永无止境的。那种认为当前人类面临的环境和环境保护问题可以在 5～10 年内解决的想法是不符合客观规律的。

当前人类面临的主要环境问题是人口、粮食、能源、资源和环境保护问题。

通过上述讨论，对环境问题的性质和实质有了较明确的认识：①就其性质而言，环境问题具有不可根除和不断发展的属性，它与人类的欲望、经济的发展、科技的进步同时产生、同时发展，呈现孪生关系。那种认为“随着科技进步、经济实力雄厚，人类环境问题就不存在了”的观点，是幼稚的想法。②环境问题范围广泛而全面,它存在于生产、生活、政治、工业、农业、科技等全部领域中。③环境问题对人类行为具有反馈作用，使人类的生产、生活、思维方式产生新变化。

环境问题的实质，既是一个经济问题，又是一个社会问题，是人类自然地，而且是自觉地建设人类自身文明的问题。

二、环境科学与环境工程学

环境科学（environmental sciences）以‘人类一环境’系统为其特定的研究对象,它是研究“人类一环境”系统的发生和发展、调节和控制以及改造和利用的科学。

环境科学的基本任务是揭示人类一环境系统的实质，研究人类一环境系统之间的协调关系，掌握它的发展规律，就能调控人类与环境之间的物质和能量交换过程，改善环境质量，造福人民，促进人类与环境之间的协调发展。

环境科学研究的内容包括：①人类和环境的关系；②污染物在自然环境中的迁移、转化、循环和积累的过程和规律；③环境污染的危害；④环境状况的调查、评价和预测；⑤环境污染的预防和治理 ⑥ 自然资源的保护和利用；⑦环境监测、分析和预报技术；⑧环境规划；⑨环境管理。

环境科学是 20 世纪 60 年代发展起来的一门新兴学科，其分科体系还不成熟，不同学者从不同角度提出了多种分科方法。按研究内容的不同，环境科学可分为三大部分：

(1)理论环境学

这是环境科学的核心，它着重于对环境科学基本理论和方法的研究。

(2)基础环境学

它是环境科学发展过程中所形成的基础学科，包括环境数学、环境物理学、环境化学、环境生态学、环境毒理学、环境地理学和环境地质学等。

(3)应用环境学

它是环境科学中实践应用的学科，包括环境控制学、环境工程学、环境经济学、环境医学、环境管理学和环境法学等。

环境科学所涉及的学科范围非常广泛，各个学科领域多边缘互相交叉渗透，同时不同地区的环境条件、生产布局和经济结构千差万别，而人与环境间的具体矛盾也各有差异，污染物运动的过程又很复杂，结果使环境科学具有强烈的综合性和鲜明的区域性。

人类与其环境之间是一个有着相互作用、相互影响、相互依存关系的对立统一体。人类的生产和生活活动作用于环境，会对环境产生影响，引起环境质量的变化；反过来，污染了的或受损害的环境也会对人类的身心健康和经济发展等造成不利的影响。

环境工程学(environmental engineering)是环境科学的一个分支，又是工程学的一个重要组成部分。它运用环境科学、工程学和其他有关学科的理论和方法，研究保护和合理利用自然资源，控制和防治环境污染，以改善环境质量，使人们得以健康和舒适地生存。

因此，环境工程学有着两个方面的任务：既要保护环境，使其免受或消除人类活动对它的有害影响；又要保护人类免受不利的环境因素对健康和安全的损害。

环境工程学是一个庞大而复杂的技术体系，它不仅研究防治环境污染和公害的技术和措施，而且研究自然资源的保护和合理利用，探讨废物资源化技术，改革生产工艺，发展无废或少废的闭路生产系统，以及对区域环境进行系统规划与科学管理，以获得最优的环境效益、社会效益和经济效益。

具体说来，环境工程学的基本内容主要有以下几个方面：

(1) 水质净化与水污 染控制工程。主要任务是研究预防和治理水体污染，保护和改善水环境质量，合理利用水资源以及提供不同用途和要求用水的工艺技术和工程措施。

(2) 大气污染控制工程。主要任务是研究预防和控制大气污染，保护和改善大气质量的工程技术措施。

(3) 固体废弃物处理处置与管理工程。主要任务是研究城市垃圾、工业废渣、放射性及其他有毒有害固体废弃物的处理、处置和回收利用、资源化等的工艺技术措施。

(4) 噪声、振动与其他公害防治技术。主要研究声音、振动、电磁辐射等对人类的影响及消除这些影响的技术途径和控制措施。

三、环境科学的发生和发展

解决环境问题的迫切需要成为推动环境科学产生和发展的巨大社会力量。环境科学随着环境问题的产生，诞生于 20 世纪 60 年代，其发展大致可分为两个阶段。

自 20 世纪 50 年代以来，由于经济的恢复和发展，生产和消费规模日益扩大，许多工业发达国家对环境造成了严重的污染和破坏，因而明确地提出了“ 环境问题 ”或“ 公害(public nuisance) ”的概念，用以概括和反映人类与环境系统关系的失调，并开辟了专门的科学领域进行研究。首先承担起这一学科研究任务的，是一些有关的先导科学。然后逐渐形成一些独立的

需要全本请访问 www.ertongbook.com

新分支科学并明确提出“环境科学”这一新词汇，用以概括这些新的分支科学。由于它们分别是不同科学内部分化出来的产物，具有一定的继承性。因而，它们分别用不同理论和方法研究和解决不同性质的环境问题，是属于多学科性的。因此，我们把这一阶段称为多学科发展阶段。它的特点是，一系列环境科学分支分别发展，大大促进了各项专门课题的研究。但在某种程度上还处于各自分别研究状态，环境科学也只是一个多学科的集合概念，还没有形成一个较完整的统一体系。

人类与环境系统关系十分复杂，它是一个以人类为中心的生态系统。环境科学在分别发展阶段已初步形成的分化形态和它所研究对象的整体性，越来越不相适应，这就促进了环境科学向整体化方向发展。虽然，分别发展阶段还远未结束，新的环境科学分支学科还在不断地产生，但由分化向整体化飞跃，已是当前环境科学发展的新阶段。它的特点是强调研究对象的整体性，把人类与环境系统看做是具有特定结构和功能的有机整体。运用系统分析和系统组合的方法，对人类与环境系统进行全面的研究。

自 1987 年“世界环境与发展委员会（World Commission on Environment and Development——WCED）”发表了《我们共同的未来》一书以来，特别是在 1992 年在巴西里约热内卢召开了“联合国环境与发展大会”以后，掀起了研究“可持续发展”的热潮，人们普遍接受了“可持续发展战略”的思想，在经济和社会的发展过程中同时合理地利用资源及防治环境问题，走经济、社会和环境协调发展的道路。

四、环境工程学的形成和发展

环境工程学是在人类保护和改善生存环境并同环境污染做斗争的过程中逐步形成的。这是一门既有悠久历史又正在新兴发展的工程技术学科。

人类文明是倚傍着水体而发展的，因为水体能提供饮用水源和支持农业与运输。所以很早人们就认识到控制水污染的重要性。早在公元前 2000 多年，中国已用陶土管修建了地下排水道，并在明朝以前就开始用明矾（alum）净水。英国在 19 世纪初开始用砂滤法净化自来水，并在 1850 年用漂白粉（bleaching powder）进行饮用水消毒，以防止水性传染病的流行。1852 年美国建立了木炭过滤的自来水厂。19 世纪后半叶，英国开始建立公共污水处理厂。第一座有生物滤池装置的城市污水厂建于 20 世纪初。1914 年出现了活性污泥法处理污水的新技术。

在大气污染控制方面，消烟除尘技术在 19 世纪后期已有所发展。1855 年美国发明了离心除尘器，20 世纪初开始采用布袋除尘器和旋风除尘器。随后，燃烧装置改造、工业气体净化和空气调节等工程技术也逐渐得到推广和应用。

在固体废弃物的处理和利用方面英国很早就颁布禁止把垃圾倒入河流的法令。1822 年德国利用矿渣制造水泥。1874 年英国建立了垃圾焚烧炉。进入 20 世纪以后，随着人口进一步向城市集中，工业生产的迅速发展，各种垃圾和固体废弃物数量剧增，对它们的管理、处置和回收利用技术也不断取得成就，逐步成为环境工程学的一个重要组成部分。

在噪声控制方面，中国和欧洲国家的一些古建筑中，墙壁和门窗都考虑了隔音的要求。20 世纪 50 年代以来，噪声已成为现代城市环境的公害之一，人们从物理学、机械学、建筑学等各个方面对噪声问题进行了广泛的研究，各种控制噪声的技术也取得了很大的进展。

多年来，尽管人们为控制各种环境污染付出了巨大的代价，但往往只是局部有所控制，总体上仍未得到解决，环境至今仍在继续恶化。因此，人们认识到控制环境污染不仅要采用单项

治理技术，还应当采用经济的、法律的和管理的各种手段和工程技术相结合的综合防治措施，并运用现代系统科学的方法和计算机技术，对环境问题及其防治措施进行综合分析，以求得整体上的最佳效果或优化方案。在这种背景下，环境规划、环境污染综合整治和环境系统工程的研究工作迅速发展起来，逐渐成为环境工程学的一个新的、重要的分支。

总之，环境工程学是在人类控制环境污染、保护和改善生存环境的斗争过程中诞生和发展的。它脱胎于土木工程、卫生工程、化学工程、机械工程等母系学科，又融入了其他自然科学和社会科学的有关原理和方法，形成了一门新兴的独立的学科。随着经济和生产的发展以及人们对环境质量要求的提高，环境工程学亦必将得到进一步的发展和完善。

思考与练习题

1. 什么是环境及环境要素？
2. 环境要素的特性有哪些？
3. 按范围大小，人类环境可分为哪些类型？
4. 环境系统有哪些特性？
5. 什么是环境问题？当前人类面临 的主要环境问题是什么？
6. 环境科学及其研究 内容是什么？
7. 环境科学的研究对象和任务是什么？
8. 按研究内容，环境科学分为哪些学科？
9. 环境科学有哪些特点？
10. 环境工程学及其任务是什么？
11. 环境工程学的基本内容有哪些？

第1章　生态学基础

1.1 概　述

随着粮食、人口、能源和环境等一系列世界性问题的出现，推动了生态学(ecology)的发展，使生态学超越了自然科学的范畴，迅速发展为当代最活跃的前沿科学之一。生态学的基本原则不仅被看做是环境科学重要的理论基础，也被看成是社会经济持续发展的理论基础。生态学不仅引起当代各学科科学家的高度重视，同时，也为各国政治领袖和社会舆论所称道。生态学正以其旺盛的生机在发展，并肩负着解决一系列世界性问题的历史使命。

1.1.1 生态学定义

“生态学”一词是由德国生物学家赫克尔(Ernst Haeckel)于 1869 年首先提出的。他把生态学定义为“自然界的经济学”。后来，也有学者把生态学定义为“研究生物或生物群体与其环境的关系，或生活着的生物与其环境之间相互联系的科学”。

我国著名生态学家马世骏把生态学定义为“研究生物与环境之间相互关系及其作用机理的科学”。这里所说的生物包括植物、动物和微生物，而环境是指各种生物特定的生存环境，包括非生物环境和生物环境。非生物环境由光、热、空气、水分和各种无机元素组成，生物环境由主体生物以外的其他一切生物组成。

由此可见，生态学不是孤立地研究生物，也不是孤立地研究环境，而是研究生物与其生存环境之间的相互关系。这种相互关系具体体现在生物与其生存环境之间作用与反作用、对立与统一、相互依赖与制约和物质循环与代谢等几个方面。

1.1.2 生态学的发展

纵观生态学的发展，可分为两个阶段：

1. 生物学分支学科阶段

20 世纪 60 年代以前，生态学基本上局限于研究生物与环境之间的相互关系，隶属于生物学的一个分支学科。初期的生态学主要以各大生物类群与环境相互关系为研究对象，因而出现了植物生态学(plant ecology)、动物生态学(animal ecology)、微生物生态学(microbial ecology)等，进而以生物有机体的组织层次与环境的相互关系为研究对象，出现了个体生态学(autecology)、种群生态学和生态系统(ecosystem)。

个体生态学是研究各种生态因子(ecological factor)对生物个体的影响。生态因子包括光照、温度、大气、水、湿度、土壤、地形、环境中的各种生物以及人类的活动等。生态因子对生物个体的影响，主要表现在引起生物个体新陈代谢的质和量的变化，物种繁殖能力和种群密度的改变，以及对种群地理分布的限制等。种群(population)是在一定的空间和时间内同种个体的组合，是具有一定组成、结构和机能，并通过种内关系组成的一个有机的统一体。一个自然种群一般都具有一定的区域分布，数量随时间而变动，具有一定的遗传特征。种群生态学主要是

研究在种群与其生存环境相互作用下，种群空间分布和数量变动的规律。

生态系统将在下一节加以阐述。

2. 综合性学科阶段

20世纪 50年代后半期以来，由于工业发展、人口膨胀，导致了粮食短缺、环境污染、资源紧张等一系列世界性问题，迫使人们不得不以极大的关注去寻求一种方法来协调人与自然的关系，探求全球持续发展的途径，人们寄希望于全人类的智慧，更期望生态学能做出自己的贡献，这种社会需求推动了生 态学的发展。

近代系统科学、控制论 、计算机技术和遥感技术的广泛应用，为生态学对复杂系统结构的分析和模拟创造了条件，为深入探索复杂系统的功能和机理提供了更为科学和先进的手段，这些相邻学科的“感召效应”也促进了生态学的高速发展。

随着现代科学技术向生态学的不断渗透，生态学被赋予了新的内容和动力，突破了生物科学的范畴，成为当代最为活跃的科学领域之一。生态学在基础研究方面，已趋向于定性和定量相结合，宏观与微观相结合，并进一步探索生物与环境之间的内在联系及其作用机理，使生态学原有的个体生态学、种群生态学、群落生态学、生态系统生态学等各个分支学科，均有不同程度地提高，达到了一个新的水平。此外，由于生态学与相邻学科的相互交融，也产生了若干新的生长点，诸如生态学与数学相结合，形成了数学生态学。数学生态学不仅对阐明复杂的生态系统提供了有效的工具，而且数学的抽象和推理也必将有助于对生态系统复杂现象的解释和有关规律的探求，导致生态学新理论和新方法的出现；生态学与化学相结合，形成化学生态学。化学生态学不仅可以揭示生物与环境之间相互作用关系的实质，而且在探索对有害生物防治方面，也提供了更有效的手段。

生态学正以前所未有的速度，在原有学科理论与方法的基础上，与环境科学及其他相关学科相互渗透，向纵深发展并不断拓宽自己的领域。生态学将以生态系统为中心，以生态工程为手段，在协调人与自然的关系，探求全球可持续发展道路的战略上，做出重要贡献。

1.2 生态系统的概念及类型

生态系统的概念是英国植物群落学家坦斯莱（A.G.Tansley)在 20 世纪 30 年代首先提出的。由于生态系统的研究内容与人类的关系十分密切，对人类的活动具有直接的指导意义，所以，很快得到了人们的重视。这一概念在 20 世纪 50 年代得到广泛传播，60 年代以后逐渐成为生态学研究的中心。

1.2.1 概　　述

生态系统是指在自然界的一定空间内生物与环境构成的统一整体。在这个统一整体中，生物与环境之间相互影响，相互制约，不断演变，并在一定时期内处于相对稳定的动平衡状态。生态系统具有一定的组成、结构和功能，是自然界的基本结构单元。也可以简单概括为：生态系统是生物群落与其生存环境组成的综合体。以上的表述只是自然生态系统的定义，不能把人类生态系统的涵义概括在内。中国的生态专家马世俊教授提出“生态系统是生命系统与环境系统在特定空间的组合”。对自然生态系统而言生命系统就是生物群落；对社会生态系统、城市生态系统、工业生态系统而言，生命系统就是人类。如城市居民与城市环境在特定空间的组合就是城市生态系统，工业生产者及管理人员与工业环境在特定空间的组合就是工业生态

系统。

生态系统是生态学研究的中心。自然生态系统是自然生态学研究的中心，自然生态系统包括了自然界的各个方面。如森林生态系统、草原生态系统、荒漠生态系统、农田生态系统、河流和湖泊生态系统以及海洋生态系统等。生态学以自然生态系统为中心，研究生态系统的生态特征、结构、功能、生态流及生态规律，以便维护生态平衡，促进生态良性循环，保证可更新资源的持续利用。各种人类生态系统（也可称为人工生态系统）比自然生态系统更为复杂。下面主要介绍自然生态系统。

1.2.2 生态系统的组成

生态系统的组成成分可分为两大类：一类是生物成分，一类是非生物成分。

1. 生物成分

生物成分可分为生产者(producer)、消费者(consumer)和分解者(decomposer)。

(1)生 产 者

生产者主要是绿色植物，包括一切能进行光合作用（photosynthesis)的高等植物、藻类和地衣。这些绿色植物体内含有光合作用色素，可利用太阳能把 CO_2 和水合成有机物，同时放出氧气。除绿色植物以外，还有利用太阳能或化学能把无机物转化为有机物的光能自养微生物和化能自养微生物。生产者在生态系统中不仅可以生产有机物，而且也能在将无机物合成有机物的同时，把太阳能转化为化学能，贮存在生成的有机物中。生产者生产的有机物及贮存的化学能，一方面供给生产者自身生长发育的需要，另一方面，也用来维持其他生物全部生命活动的需要，是其他生物类群以及人类的食物和能源的供应者。

(2) 消 费 者

消费者属异养生物，主要是指动物，它们以其他生物或有机质为食。其中以植物为食的食草动物称为一级消费者；以食草动物为食的食肉动物称为二级消费者；以二级消费者为食的食肉动物称为三级消费者。消费者在生态系统中的作用之一，是实现物质与能量的传递。如草原生态系统中的青草、野兔与狼，其中，野兔就起着把青草制造的有机物和贮存的能量传递给狼的作用，消费者的另一个作用是实现物质的再生产，如食草动物可以把草本植物的植物性蛋白再生产为动物性蛋白。所以，消费者又可称为次级生产者。

(3) 分 解 者

分解者也称还原者(reducer)，主要是指细菌和真菌等微生物。分解者的作用，就在于把生产者和消费者的残体分解为简单的物质，再供给生产者。所以，分解者对生态系统中的物质循环具有非常重要的作用。

分解者的分解作用可分为三个阶段：

1)物理的或生物的作用阶段——分解者把动植物残体分解成颗粒状的碎屑；

2)腐生生物的作用阶段—— 分解者将碎屑再分解成腐殖酸或其他可溶性的有机酸；

3)腐殖酸的矿化作用阶段。

从广义角度可以认为，参与这三个阶段的各种生物都应属于分解者。蚯蚓、蜈蚣、马陆以及各种土壤线虫等土壤动物，在动植物残体分解过程的第一阶段起着非常重要的作用。另一些动物，如鼠类等啮齿动物也会把植物咬成大量碎屑，残留在土壤中。所以，虽然分解者主要是指微生物，同时也应包括某些小型动物。

2. 非生物成分

非生物成分是指各种环境要素，包括温度、光照、大气、水、土壤、气候、各种矿物质和非生物成分的有机质等。非生物成分在生态系统中的作用，一方面是为各种生物提供必要的生存环境，另一方面是为各种生物提供必要的营养元素。

以上成分构成了一个有机的统一整体。在这个有机整体中，能量与物质在不断地流动，并在一定条件下保持着相对平衡。

不同的生态系统，其具体的组成成分也会各不相同。如陆生生态系统的生产者是各种陆生植物，消费者是各种陆生动物，分解者主要是土壤微生物；而水生生态系统，其生产者则是各水生植物，消费者则是各种水生动物，分解者则是各种水生微生物。不同生态系统的非生物成分，也存在着一定的差异。

1.2.3 生态系统的结构

构成生态系统的各个组成部分，各种生物的种类、数量和空间配置，在一定时期均处于相对稳定的状态，使生态系统能够各自保持一个相对稳定的结构。对生态系统结构的研究，目前多着眼于形态结构和营养结构。

1. 形态结构

生态系统的生物种类、种群数量、种的空间配置和时间变化等，构成了生态系统的形态结构。例如，一个森林生态系统，其中植物、动物和微生物的种类与数量基本上是稳定的。它们在空间分布上具有明显的成层现象，即明显的垂直分布。在地上部分，自上而下有乔木层、灌木层、草本植物层和苔藓地衣层；在地下部分，有浅根系、深根系及其根际微生物。在森林中栖息的各种动物，也都有其各自相对的空间分布位置，许多鸟类在树上营巢，许多兽类在地面筑窝，许多鼠类在地下掘洞。在水平分布上，林缘、林内植物和动物的分布也有明显不同。

形态结构的另一种表现是时间变化。同一个生态系统，在不同的时期或不同季节，存在着有规律的时间变化。如长白山森林生态系统，冬季满山白雪覆盖，到处是一片林海雪原；春季冰雪融化，绿草如茵 夏季鲜花遍野，五彩缤纷 秋季又是果实累累，气象万千。不仅在不同季节有着不同的季相变化，就是昼夜之间，其形态也会表现出明显的差异。

2. 营养结构

生态系统各组成部分之间，通过营养联系构成了生态系统的营养结构，其一般模式可用图 1-1 表示。

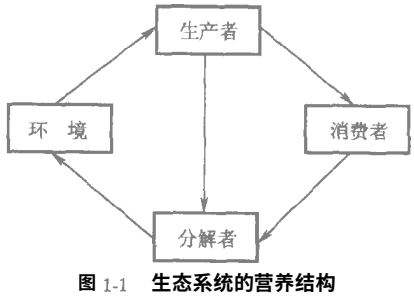

图 1-1 生态系统的营养结构

生产者可向消费者和分解者分别提供营养，消费者也可向分解者提供营养，分解者又可把营养物质输送给环境，由环境再供给生产者。这既是物质在生态系统中的循环过程，也是生态系统营养结构的表现形式。不同生态系统的成分不同，其营养结构的具体表现形式也会因之各异。

1.2.4 生态系统的类型

自然界中的生态系统是多种多样的，为研究方便起见，人们从不同角度把生态系统分成若干个类型。按环境中的水体状况，可把地球上的生态系统划分为水生生态系统和陆生生态系统两大类群。水生生态系统又可以划分为淡水生态系统和海洋生态系统。淡水生态系统包括

需要全本请访问 www.ertongbook.com

江、河等流水生态系统和湖泊、水库等静水生态系统；海洋生态系统包括滨海生态系统和大洋生态系统等；陆生生态系统分为荒漠生态系统、草原生态系统、森林生态系统和冻原生态系统等。

按人为干预的程度划分，又可以分为自然生态系统、半自然生态系统和人工生态系统。自然生态系统指没有或基本没有受到人为干预的生态系统，如原始森林、未经放牧的草原、人迹罕至的沙漠等；半自然生态系统指受到人为干预，但其环境仍保持一定自然状态的生态系统，如人工抚育过的森林、经过放牧的草原、养殖湖泊和农田等；人工生态系统指完全按照人类的意愿，有目的、有计划地建立起来的生态系统，如城市、工厂、矿山、宇宙飞船和潜艇的密封舱等。

生态系统的大小，也可以根据人们研究的需要而划定，所以，小到自然界中的一滴水，大到地球表面的生物圈，都可以称之为一个生态系统。也可以说，整个生物圈就是由无数个大大小小的生态系统所组成的，每个生态系统则是自然界的基本结构单元。

1.3 生态系统的功能

生态系统的功能主要表现在生态系统具有一定的能量流动、物质循环和信息联系。食物链（网）和营养级是实现这些功能的保证。

1.3.1 食物链(网)和营养级

1.食 物 链

食物链(food chain)是各种生物以食物为联系建立起来的链索。按生物间的相互关系，一般食物链可分为下述三种类型：

(1) 捕食性食物链

以生产者为基础，其构成形式是植物→食草动物→食肉动物，后者可以捕食前者。如在草原上,青草→野兔→狐狸→狼;在湖泊中,藻类→甲壳类→小鱼→大鱼。

(2) 腐食性食物链

以动植物遗体为基础，由细菌、真菌等微生物或某些动物对其进行腐殖质化或矿化。如植物遗体→蚯蚓→线虫类→节肢动物。在这种食物链中，分解者起主要作用，故也称为分解链。一般，初级生产者属生产量高、转化效率低的生态系统。如森林生态系统等即以腐食链为主。在森林生态系统中,90% 的净生产是以腐食食物链消耗掉的。

(3) 寄生性食物链

以活的动植物有机体为基础，再寄生以寄生生物，前者为后者的寄主。这是食物链中一种特殊的类型。如牧草→黄鼠→跳蚤→鼠疫病菌。

在各种类型的生态系统中，三种食物链几乎同时存在，各种食物链相互配合，保证了能量流动在生态系统内畅通。

食物链在各个生态系统中都不是固定不变的。动物个体发育的不同阶段，食性会发生改变。某些动物在不同季节中，食性也会发生改变。由于自然界食物条件的改变而引起主要食物组成的改变等，都会引起食物链的改变。因此，食物链往往具有暂时性。食物链上某一环节的变化，往往会引起整个食物链的变化，甚至影响生态系统的结构。

此外，生态系统中各种生物的食物关系都是十分复杂的。例如，一个草原生态系统有很多

种青草,食草动物除野兔外,还会有鼠、鹿等,狼既吃野兔,也吃鹿。所以,任何一个生态系统的食物链也都是很复杂的，并且交织在一起，成为网状，即形成了所谓的食物网(food web)。

2. 营 养 级

食物链上的各个环节叫营养级（trophic level)。生产者为第一营养级，一级消费者为第二营养级，依次为第三营养级、第四营养级。食物链的加长不是无限制的，营养级一般只有 4～5 级。各营养级上的生物不会只有一种，凡在同一层次上的生物都属于同一营养级。由于食物关系的复杂性，同一生物也可能隶属于不同的营养级。

低位营养级是高位营养级的营养及能量的供应者，但低位营养级的能量仅有 10%左右能被上一营养级利用。为了保证生态系统中能量的流通，自然界就形成了生物数量金字塔、生物量金字塔和生产力金字塔（图 1-2、图 1-3、图 1-4，图中符号 P 为生产者，C 为消费者，S 为腐蚀生物）等。在寄生性食物链上，生物数量往往呈倒金字塔形。在海洋中的浮游植物与浮游动物之间,其生物量也往往呈倒金字塔形(图 1-5)。

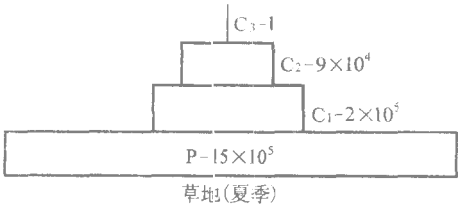

图 1-2 生物数量金字塔
（单位：个体/0.1 km²）

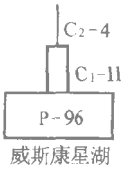

图 1-3 生物量金字塔
（单位：g/m²）

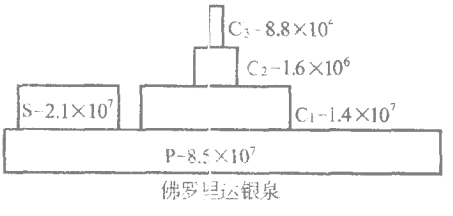

图 1-4 生产力金字塔
（单位：J/(m²·a)）

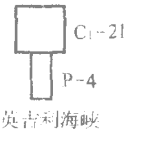

图 1-5 倒置的生物量金字塔
（单位：g/m²）

1.3.2 生态系统中的能量流动

所有生物的各种生命活动都需要消耗能量。能量在流动过程中也会由一种形式转变成另一种形式，在转变过程中既不会消失，也不会增加。能量的传递是按照从集中到分散，从能量高到能量低的方向进行的，在传递过程中又总会有一部分成为无用能释放。

生态系统中全部生命活动所需要的能量最初均来自太阳。太阳能被生物利用，是通过绿色植物的光合作用实现的。光合作用的化学方程式为：

$$6CO_2 + 6H_2O \xrightarrow[\text{光合作用色素}]{2\,817.8\text{kJ}} C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

在合成有机物的同时太阳能也转变成化学能贮存在有机物中。通过食物链，在传递营养物质的同时，绿色植物体内贮存的能量，依次传递给食草动物和食肉动物。动植物的残体被分解者分解时，又把能量传给了分解者。此外，生产者、消费者和分解者的呼吸作用都会消耗一

部分能量，其消耗的能量被释放到环境中去，这就是能量在生态系统中的流动（图 1-6）。

1.3.3 生态系统中的物质循环

在生态系统的各个组成部分之间，不断进行着物质循环。碳、氢、氧、氮、磷、硫是构成生命有机体的主要物质，也是自然界中的主要元素，因此这些物质的循环是生态系统基本的物质循环。镁、钙、钾、硫、钠等是生命活动需要的大量元素，而锌、铜、硼、锰、钼、钴、铝、铬、氟、碘、溴、硒、硅、锶、钛、钒、锡、镓等是生命需要的微量元素，它们在生态系统中也构成各自的循环。

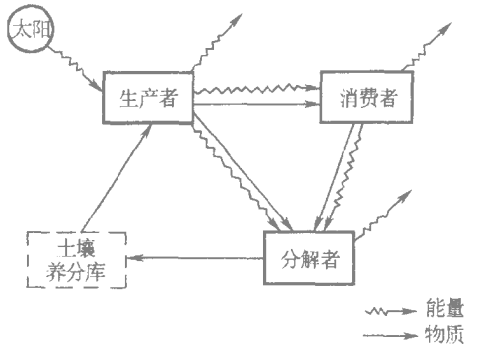

图 1-6 生态系统中的能量流动与物质循环

各种元素在环境中都存在一个或多个贮库。元素在贮库中的数量大大超过结合于生物体中的数量，从贮库向外释放的速度往往很慢。某物质的库量与流通率之比，称为周转时间，表示其在该库中更新一次所需要的时间。水在大气贮库中的周转时间是 10.5 d，氮在大气库中的周转时间近 100 万a，硅在海洋库中的周转时间是 8 000 a，钠在海洋库中的周转时间是 2 060 万a。

物质在库与库之间的转移，就是物质流动，这种物质流动构成的循环，即称为物质循环。参与生命活动的各种元素的循环，可在三个水平上进行：第一级水平是在个体水平 上进行的，即生物个体通过新陈代谢，与环境不断进行物质交换；第二级水平是在生态系统中进行的，即在生产者、消费者、分解者及环境之间进行的物质循环，这种循环也称为营养循环或生 物循环；第三级水平是在生物圈中进行的，即在生物圈范围内的各个层圈中进行的物质循环这种循环又称为生物地球化学循环。根据贮库性质的不同，地球化学循环又可分为三种类型，即水循环、气态型循环和沉积型循环。气态型循环的主要贮库是大气，元素在大气中以气态出现，如碳、氮的循环。沉积型循环的主要贮库是土壤、岩石和地壳，元素以固态出现，如磷的循环。

1. 水 循 环

水由氢和氧组成，是生命过程氢的主要来源，一切生命有机体的主要成分都是由水组成的。水又是生态系统中能量流动和物质循环的介质，整个生命活动就处在无限的水循环之中。

水循环的动力是太阳辐射。水循环主要是在地表水的蒸发与大气降水之间进行的。海洋、湖泊、河流等地表水通过蒸发，进入大气 植物吸收到体内的大部分水分通过蒸发和蒸腾作用，也进入大气。在大气中水分遇冷，形成雨、雪、雹，重新返回地面，一部分直接落入海洋、河流和湖泊等水域中；一部分落到陆地表面，渗入地下，形成地下水，供植物根系吸收；另一部分在地表形成径流，流入河流、湖泊和海洋，如图 1-7 所示。

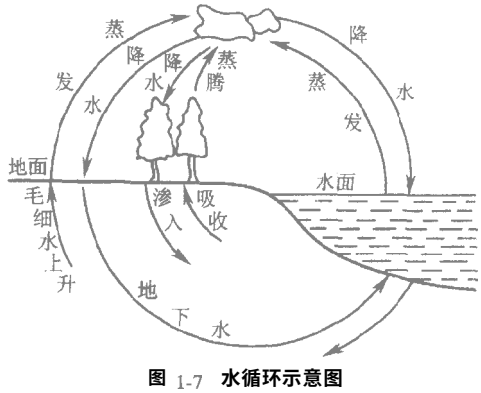

图 1-7 水循环示意图

2. 碳 循 环

碳存在于生物有机体和无机环境中，是构成生物有机体的主要元素之一，约占生活物质的 25%。在无机环境中，碳主要以 CO_2 和碳酸盐的形式存在。在地球表层，碳主要以碳酸盐的

形式存在，碳的贮量约为 2.7×10^{16}t。大气中的碳主要以 CO_2 的形式存在，其中碳贮量约为 7×10^{11}t。大气圈、水圈和生物圈(包括生物体)中的碳含量虽然较小，但很活跃，交换迅速，被称为碳循环的交换库或循环库 。碳的循环就是在这些贮库之间进行的。

绿色植物在碳循环中起着重要作用。大气中 CO_2 被生物利用的惟一途径是绿色植物的光合作用。被绿色植物固定的碳以有机物的形式供消费者利用。生产者和消费者通过呼吸作用又把 CO_2 释放到大气中。生产者和消费者的尸体被分解者分解，把蛋白质、脂肪和碳水化合物分解成 CO_2、水和无机盐，CO_2 重新返回大气。在地质年代，动植物尸体长期埋藏在地层中，形成各种化石燃料，人们燃烧这些化石燃料时，燃料中的碳氧化成 CO_2 被释放到大气中。另外，海洋中的碳酸钙沉积在海底，形成新的岩石，使一部分碳较长时间贮藏在地层中。相反，在火山爆发时，又可使地层中的一部分碳回到大气层。碳的循环途径如图 1-8 所示。

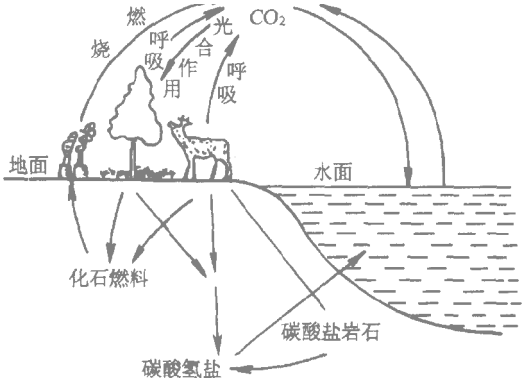

图 1-8　碳循环示意图

由于人为活动向大气中输入了大量的 CO_2，而森林面积又不断缩小，大气中被植物利用的 CO_2 量越来越少，结果使大气中 CO_2 的浓度有了显著增加。如不采取有效措施，由此将产生全球气候变暖的“温室效应”。

3. 氮 循 环

氮是生物的必需元素，是各种氨基酸和蛋白质的构成元素之一。氮也是大气的主要组成成分，在大气中占 79%。

氮循环主要是在大气、生物、土壤和海洋之间进行。大气中的氮进入生物有机体主要有四种途径。一是生物固氮，豆科植物和其他少数高等植物能通过根瘤的固氮菌固定大气中的氮。二是工业固氮，是人类通过工业手段，将大气中的氮合成氨或铵盐，即合成氮肥，供植物利用。三是岩浆固氮，火山爆发时喷出的岩浆，可以固定一部分氮。四是大气固氮，由雷雨天气发生的闪电现象而产生的电离作用，可以使大气中的氮氧化成硝酸盐，经雨水淋洗带入土壤。土壤中的氨或铵盐，经硝化细菌的硝化作用，形成亚硝酸盐或硝酸盐，被植物利用。氨在植物体内与复杂的含碳分子结合，形成各种氨基酸，氨基酸是构成蛋白质、核酸等的主要成分。动物直接或间接从植物中摄取植物性蛋白，作为自己蛋白质组成的来源，并在新陈代谢过程中将一部分蛋白质分解成氨、尿素和尿酸等排出体外，渗入土壤。动植物残体在土壤微生物的作用下，分解成 NH_3、CO_2 和 H_2O，这些氨也进入土壤。土壤中的氨形成硝酸盐后，一部分为植物利用，另一部分在反硝化细菌的作用下，分解成游离氮，进入大气，完成氮的循环(图 1-9)。

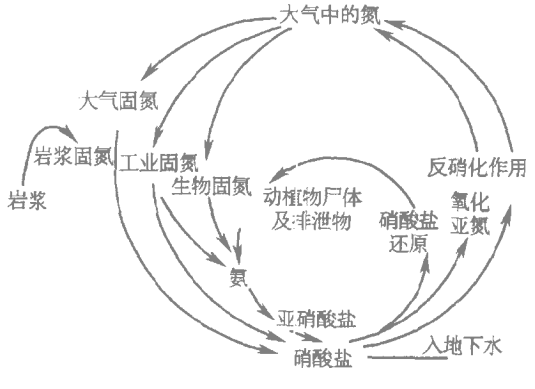

图 1-9　氮循环示意图

在氮循环中，工业固氮量是很大的。据统计，1968 年全世界工业固氮总量约为 30×10^6 t，与全部陆生生态系统的固氮量几乎相等。由于这种人为干扰，使氮循环的平衡被破坏，每年被固定的氮超过了返回大气的氮。这些停留在地表的氮进入了江河、湖泊或沿海水域，是造成地表水体出现富营养化的重要原因之一。氮以硝酸盐的形式进入水体，可以通过食物链被人类摄入，硝酸盐在人体内经生物转化，可生成亚硝酸盐。亚硝酸盐能降低血液对氧的输送能力，又可以与仲胺发生反应，生成亚硝酸胺（亚硝酸胺是一种致癌物质）。氮被从大气中固定后，不能以相应数量的分子氮返回大气，但却形成一部分氮氧化物进入大气圈。这些氮氧化物在大气中与碳氢化物等经光化学反应，形成光化学烟雾，对生物和人类造成危害。NO_2 进入臭氧层，还会与 O_3 发生反应，降低 O_3 含量，减弱臭氧层阻止紫外线向地面辐射的能力，从而又造成人类皮肤癌的增加。

4. 硫 循 环

硫是构成氨基酸和蛋白的基本成分，它以硫键的形式把蛋白质分子连接起来，对蛋白质的构型起着重要作用。

硫循环兼有气态型循环和沉积型循环的双重特性。SO_2 和 H_2S 是硫循环中的重要组成部分，属气态型；硫酸盐被长期束缚在有机或无机沉积物中，释放十分缓慢，属于沉积型。

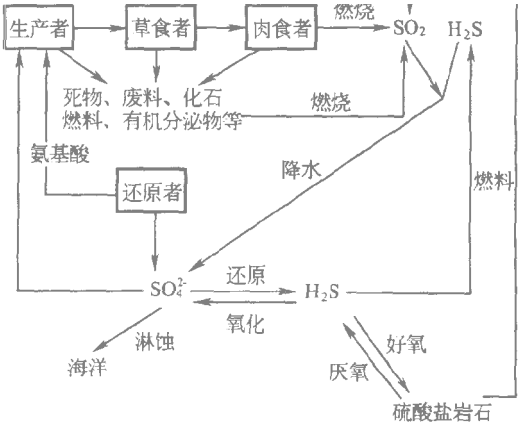

图 1-10 硫循环示意图

大气中的 SO_2 主要来自含硫矿物的冶炼、化石燃料的燃烧以及动植物废物及其残体的燃烧后进入大气的 H_2S 也可以很快转化为 SO_2。大气中的 SO_2 及 H_2S 经雨水的淋洗后进入土壤，形成硫酸盐；动植物残体经微生物分解，也形成硫酸盐。土壤中的硫酸盐一部分供植物直接吸收利用，另一部分则沉积海底，形成岩石。硫的循环途径如图 1-10 所示。

人类对硫循环的干扰，主要是化石燃料的燃烧，向大气排放了大量 SO_2。据统计，人类每年向大气输入的 SO_2 达 1.47×10^8 t，其中 70% 来源于煤的燃烧。硫进入大气，不仅对生物和人体健康带来直接危害，而且还会形成酸雨，使地表水和土壤酸化，对生物和人类的生存造成更大的威胁。

1.3.4 生态系统中的信息联系

在生态系统的各组成部分之间及各组成部分的内部，存在着各种形式的信息联系，这些信息使生态系统联系成为一个有机的整体。生态系统中的信息形式主要有营养信息、化学信息、物理信息和行为信息。

1. 营养信息

通过营养交换的形式，把信息从一个种群传递给另一个种群，或从一个个体传递给另一个个体，即为营养信息。食物链（网）即可视为一个营养信息系统。以草本植物、鼠类、鹌鹑和猫头鹰组成的食物链为例，可表示为：当鹌鹑数量较多时，猫头鹰大量捕食鹌鹑，鼠类很少受害；

当鹌鹑数量较少时，猫头鹰转而大量捕食鼠类。这样，通过猫头鹰对鼠类捕食的轻重，向鼠类传递了鹌鹑多少的信息。

2. 化学信息

生物在某些特定的条件下，或某个生长发育阶段，分泌出某些特殊的化学物质，这些分泌物对生物不是提供营养，而是在生物的个体或种群之间起着某种信息的传递作用，此种物质即称为化学信息素。

蚂蚁可以通过自己的分泌物留下化学痕迹，以便后者跟随。猫、狗等可通过排尿标识自己的行踪和活动区域。

化学信息对集群活动的整体性和集群整体性的维持，具有极重要的作用。

3. 物理信息

通过声音、颜色和光等物理现象传递的信息，称为物理信息。鸟鸣、兽吼可以传达惊慌、安全、恫吓、警告、嫌恶、有无食物和要求配偶等各种信息。大雁迁飞时，中途停歇，总会有一只“哨兵”担任警戒，一旦“哨兵”发现“敌情”，即会发出一种特殊的鸣声，向同伴们传达出敌袭的信息，雁群即刻起飞。昆虫可以根据花的颜色判断食物——有无花蜜。以浮游藻类为食的鱼类，由于光线越强，食物越多，所以，光可以传递有食物的信息。

4. 行为信息

动物可以通过自己的各种行为向同伴们发出识别、威吓、求偶和挑战等信息。如燕子在求偶时，雄燕会围绕雌燕在空中做出特殊的飞行形式。

尽管现代的科学水平对这些自然界的“对话”之谜尚未完全解开，但这些信息对种群和生态系统调节的重要意义，是完全可以肯定的。

1.4 生态平衡

1.4.1 生态平衡的概念

如果某生态系统各组成成分在较长时间内保持相对协调，物质和能量的输入输出接近相等，结构与功能长期处于稳定状态，在外来干扰下，能通过自我调节恢复到最初的稳定状态，则这种状态可称为生态平衡（ecological balance）。也就是说，生态平衡应包括三个方面，即结构上的平衡、功能上的平衡，以及输入和输出物质数量上的平衡。

生态平衡是相对的。任何生态系统都不是孤立的，都会与外界发生直接的联系，会经常受到外界的冲击。生态系统的某一个部分或某一个环节，经常在允许限度内有所变化，只是由于生物对环境的适应性，以及整个系统的自我调节机制，才使系统保持相对的稳定状态。所以，生态系统的平衡是相对的，不平衡是绝对的。

生态平衡是动态平衡，不是静态平衡，生态系统的各组成成分会不断地按照一定的规律运动或变化，能量会不断地流动，物质会不断地循环，整个系统都处于动态平衡之中。

1.4.2 保持生态平衡的因素

生态系统之所以能保持相对的平衡状态，是因为生态系统本身具有自动调节的能力。如在森林生态系统中，若由于某种原因森林害虫大规模发生，在一般情况下不会使森林生态系统遭到毁灭性的破坏。因为当害虫大规模发生时，以这种害虫为食的鸟类获得了更多的食物，这就促进了该食虫鸟的大量繁殖并捕食大量害虫，从而抑制了害虫的大规模发生。但是任何一

需要全本请访问 www.ertongbook.com