

10

第十章

生物与环境

第一节 生态学的层次和生态因子

- 一、生态学研究的层次
- 二、环境及生态因子
- 三、环境与生物习性及动物的行为

第二节 种群生态

- 一、种群的结构
- 二、种群增长特征
- 三、种群增长的调节
- 四、人口的结构和增长

第三节 生物群落

- 一、群落的基本特征与结构
- 二、地球上的主要群落类型
- 三、群落内生物之间的相互关系
- 四、群落的演替和扰动

第四节 生态系统

- 一、生态系统的概念
- 二、生态系统的营养结构
- 三、生态系统中的能量流动
- 四、与生命活动相关联的物质循环

第五节 生物多样性、人口、资源与可持续发展

- 一、生物多样性及其意义
- 二、人口增长与生态环境的人口承载容量
- 三、资源压力及生态环境面临的严重问题
- 四、生态平衡和人类社会可持续发展战略

生物与环境的关系及相互作用包括了从个体到群体、从局部到全局、从微观到宏观的不同层次。

地球上一切生命形式，包括植物、动物、微生物等，都有各不相同的生存环境（environment）。**环境**是指某一特定生物或生物群体周围一切的总和，它包括在一定空间内直接或间接影响该生物或生物群体生存的各种因素。研究生物及其生存环境之间相互关系和作用规律的科学称为生态学。环境的特征及其变化决定了生物的分布和多样性，生物的活动又对环境产生影响。生物与环境的关系及相互作用包括了从个体到群体，从局部到全局，从微观到宏观不同的层次。本章先介绍生态学的层次和生态因子（ecological factor），然后在不同的生态层次上讨论生物与环境相互关系的性质和相互作用的结果。

第一节 生态学的层次和生态因子

一、生态学研究的层次

在地球的表面，几乎到处都是生机勃勃的生命，它们在不同环境下生存和繁衍，各种植物、动物和微生物与环境构成了不同的生态系统。**生态系统**是指在一定空间中各类生物以及与其相关联的环境因子的集合，它是生命的家园。在不同的生态系统中，各种生命通过一张极其复杂的食物网来获取和传递太阳的能量，同时完成物质的循环（图10-1）。全球生态系统的总和称为**生物圈**，

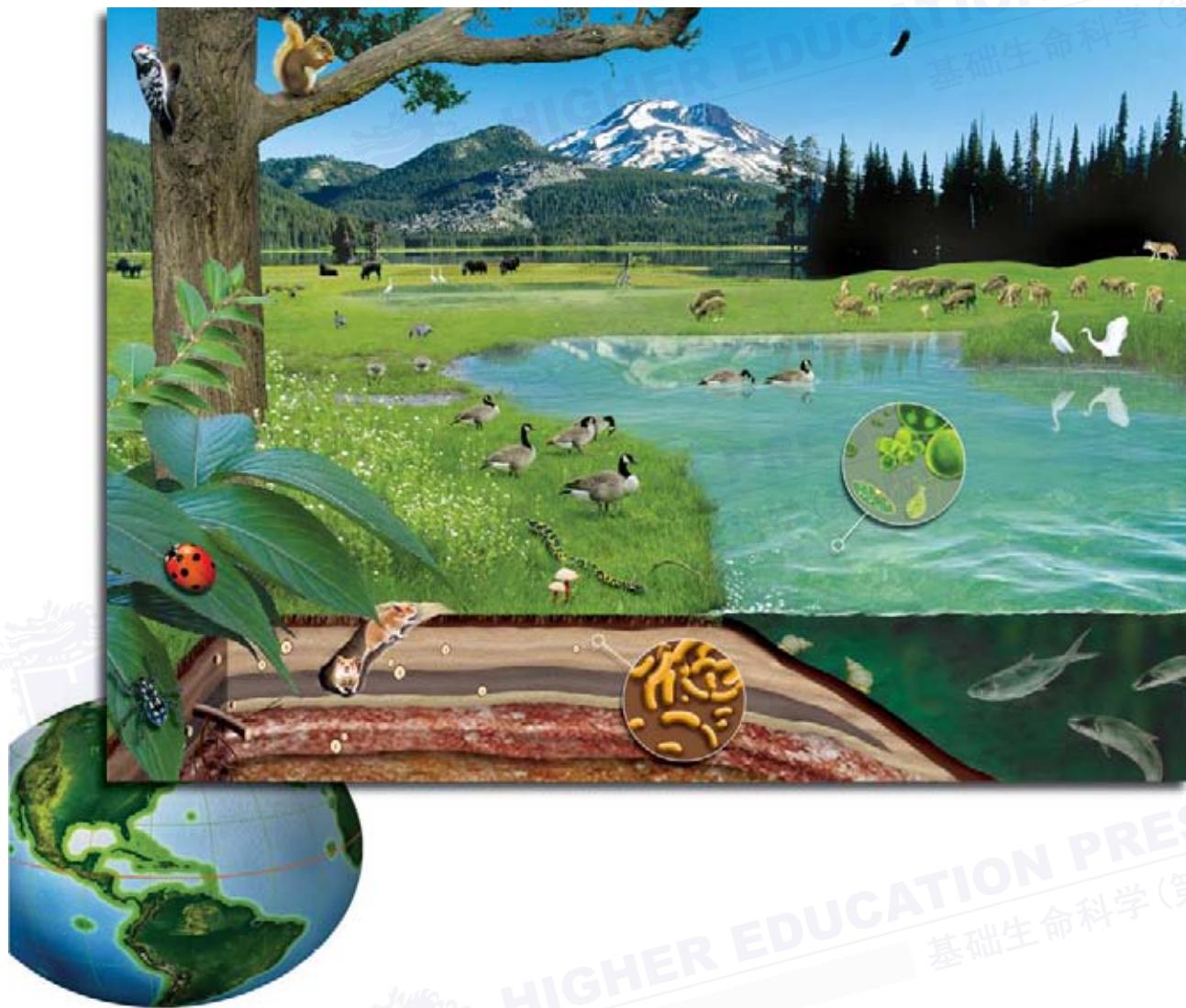


图10-1 生命的家园 生物圈是全球生态系统的总和，它包括地球上全部生物及其栖息场所。生物圈包括大气圈下层、水圈和岩石圈上层，范围十分广泛。绝大部分生物的生活范围集中在地面以上100米到水面以下200米的空间内。在生物圈的核心部分有充足的太阳光能，有适于生命活动的温度条件，有生物可以利用的大量液态水、氧气以及各种营养元素。

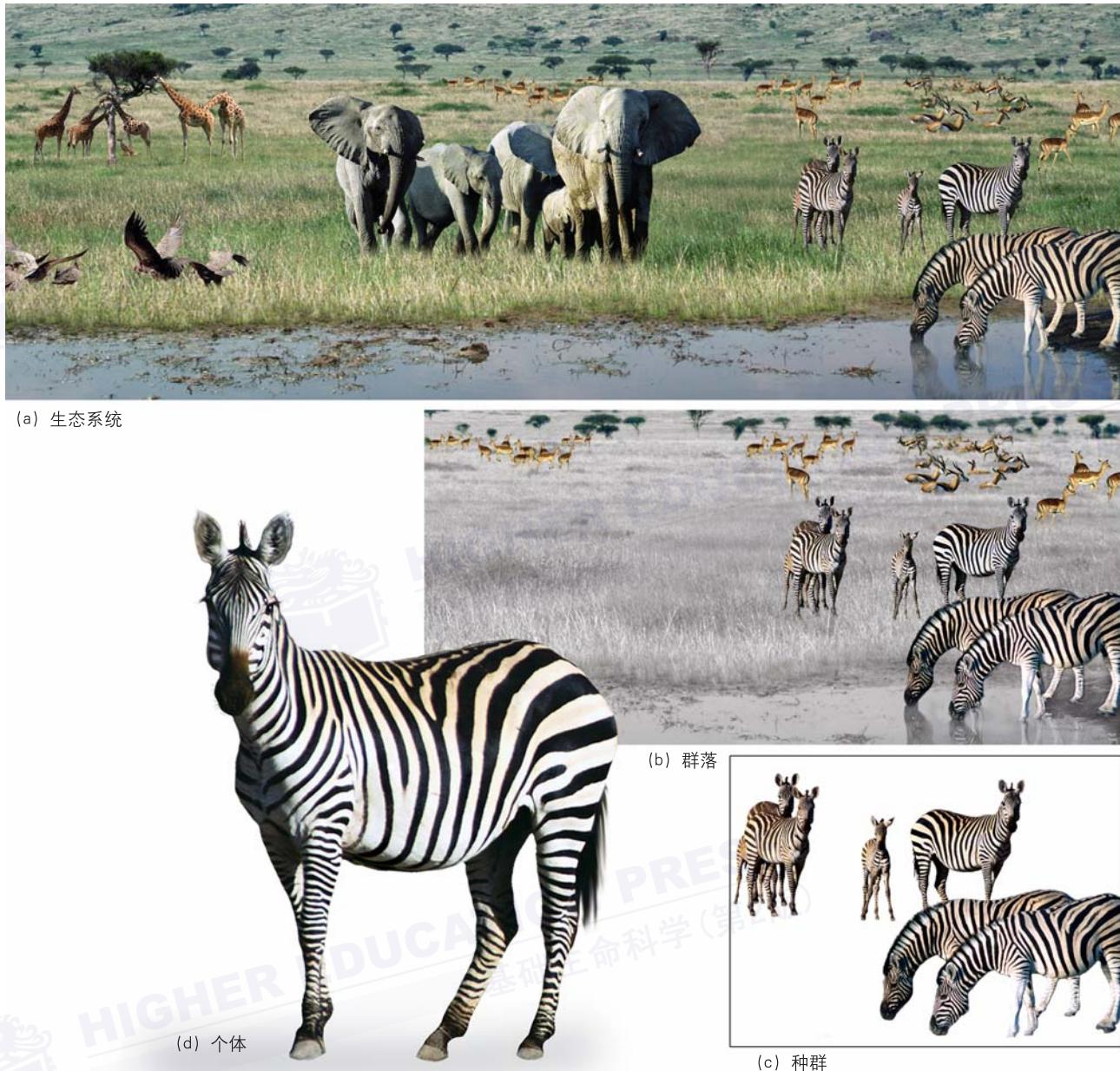


图 10-2 生物与环境关系的不同层次水平 简单地说，在一定空间和时间内的同种生物个体的总和构成种群；生活在一定的自然区域内，相互之间具有直接或间接关系的各种生物种群的总和即为群落；生物群落及其所生活的无机环境相互作用的自然系统，就是生态系统。

或者说，生物圈是地球上全部生物及其栖息场所的总称。它包括岩石圈上层、水圈和大气圈下层。组成生态系统最主要的单元是生物群落，生物群落的构成单元是种群，**种群**是同种生物个体的集合体。生态学的层次从个体、种群、群落、生态系统到整个生物圈逐级放大（图 10-2）。

生态学家对于生物与环境的关系和相互作用的研究是在不同的层次上进行的。在个体水平上，他们可能会重点考察某一种生物如何应对环境变化的挑战。例如研

究在极端高温条件（如温泉）中存活的某种细菌的形态结构和代谢机理的特征，探讨其为什么能在这种极端高温下生存。

在一定空间中的一群同种生物个体称为**种群**。例如，生活在中国四川等地高山密林中的一群珍稀野生动物金丝猴，便是一个种群，以树林池塘为伴的一群长颈鹿是另一个种群。在种群的水平上，生态学家可能对影响金丝猴的繁殖和数量增减的关键环境因素感兴趣，另一些

生态学家可能专注于研究金丝猴种群在环境因子影响下的遗传变异和进化等问题。

在种群之上更高的层次是群落。在一个特定的环境区域内生存的多种不同的种群便组成为**群落**(图10-2)。同一群落内不同种群的相互关系和相互作用、同一群落内不同种群的兴衰等是生态学家在群落水平上展开的主要研究课题。他们还关注不同种群生物间的相互作用，如捕食、竞争等。

生态学的第四个层次便是生态系统。**生态系统**是指一定空间中共同栖居的所有生物与其环境之间由于不断地物质循环和能量流动过程而形成的统一整体。生态系统中物质的循环和能量的流动、生态系统的稳定与平衡以及影响平衡的因素及相关结果等等都是生态学家在这一层次上所关心的重要问题。

二、环境及生态因子

环境与生物的相互作用包括两个方面：一方面，生物的生长、繁殖、代谢和分布等一切活动都要受到环境的影响和制约；另一方面，生物的活动又反过来会引起环境的变化。这里我们先讨论影响和制约生物活动的环境与生态因子(也可称为因素)，生物活动对环境的作用将在后面部分进行讨论。

对于某个生物，其周围一切客观存在都是它的环境。生物的环境因素按性质可分为非生物因子(abiotic factor)和生物因子(biotic factor)两大类。生态学家将生物生存不可缺少的环境条件称为**生态因子**，而对于生物体外部的全部环境要素则称为**环境因子**。生态学与环境科学是密切相关联的两个学科，生态学家从环境的角度来研究生物，环境科学家则主要以生物为参考对象进行环境变化规律及其保护或改善的研究。从某种意义上说，没有生物，就谈不上所谓的环境，环境往往是针对生物而言的。

影响生物活动的非生物因子(包括环境因子和生态因子)有以下几类：

1. 气候因子 包括阳光、温度、湿度、降雨、风、气压、雷电等。
2. 营养因子 对于植物来说，其主要营养因子是一些无机元素；对于动物，其主要的营养因子则是有机物。
3. 水因子 包括水量、水中的氢离子浓度(即pH)和盐浓度。

4. 土壤、地形和地理因子 主要对陆生动植物而言，包括土壤的结构、理化性质，山脉的起伏程度，山脉的阳面与阴面、地形和地理位置等等。

5. 海洋地理因子 对海洋动植物来说，海水的深度、洋流的变化和海岸带地理位置，如河口、潮上带、潮间带和潮下带等。

6. 大气成分 包括空气中氧的浓度和二氧化碳的浓度等等。

7. 自然灾变 如火山喷发、地震、森林大火、冰川融化引起海平面上升等。

8. 地质条件 大范围和长时间尺度的地质构造变化引起的造山运动或形成盆地、峡谷等。

影响生物活动的环境因子包括：

1. 生物之间的各种相互作用。
2. 人类的活动对自然界其他生物产生的影响。
3. 政治、经济、文化、科学技术等社会环境因素对个人和整个人类的作用和影响。

当我们提问，在一个地区影响某一种生物或者一个生物群落最重要的生态因子是什么？我们首先想到的是气候，特别是温度和降雨。在各类环境和生态因子中，气候因子尤为重要，因为气候因子决定了一个区域环境中的温度、光照、降水与湿度等一些控制生物活动最重要和最直接的因子(图10-3)。

整个地球上温度变化的幅度相当大，而生物能够生存的温度范围则相对比较小。除极个别特例外，在0℃以下或50℃以上，控制生化反应的酶都会失活，一般生物体内都很难保持正常的新陈代谢活动。每种生物对各生态因子都有一个耐受范围，各种生物对生态因子(如温度)所能耐受的上限与下限之间的幅度称为**生态幅**(ecological amplitude)，它反映了生物对环境的适应能力。生态幅广的生物种类称为**广适性生物**(eurytopic organism)，如一些鸟类就是广适性生物，其分布范围也较广；生态幅小的生物种类称为**狭适性生物**(stenotopic organism)，如南极的企鹅、赤道海域的热带鱼、中国的大熊猫等就是狭适性生物，其分布范围较小。图10-4显示了不同类型的生物对温度的适应幅度。

早在1840年，德国科学家Justus von Liebig通过分析土壤营养与植物生长之间的关系，就生态因子对生物生存的限制作用，提出了**最小因子法则**(law of the minimum，又称为利比希法则)，即每一种植物都需要一定种类和一



图 10-3 一个区域环境中的温度、光照、降雨与湿度等气候因子是控制生物特征和活动最重要和最直接的因子 (a) 中国海南岛热带海洋性气候环境, 决定岛上生长了一些典型的热带植物, 如椰树就是最典型的热带植物。(b) 中国西部戈壁滩干旱的沙漠气候环境中分布的稀疏的耐旱植物, 如仙人掌、胡杨、沙棘等, 它们凭借独特的适应干旱气候的形态生理结构, 才能在沙漠中生存。

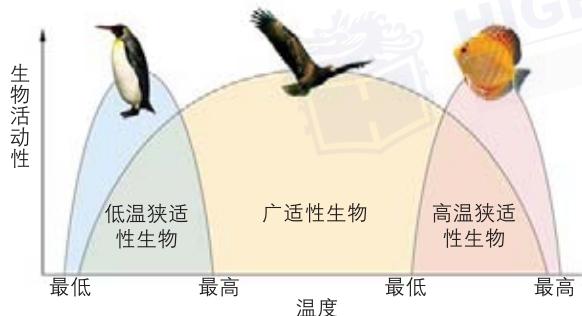


图 10-4 广温性种和狭温性种的适应幅度 狹适性生物(如企鹅、热带鱼类)所能适应的生态因子的变化范围较小, 从而决定了它们的分布范围较小。而相反, 广适性生物(如许多鸟类)凭借其对环境较强的适应力, 可以在更广阔的范围生活。

定数量的营养物, 如果其中有一种营养物完全缺失, 植物就不能生长。如果该营养物质数量极微, 植物的生长就会受到限制。以后, 又有一些生态学家对利比希的最小因子法则进行了补充和完善, 形成了限制因子的概念: 生物的生存和活动依赖于各种生态因子的综合作用, 其中有一种或少数几种起关键作用的因子就是限制性因子。任何一种生态因子只要接近或超过生物所能耐受的极限, 就会成为这种生物的限制因子。

降水和湿度影响着生物的生长、发育、行为和寿命。水是生物体的重要组成部分, 也是生物体内生化过程的介质。植物需要通过根部不断地吸收水分进行光合作用和蒸腾作用; 依赖于水分的植物其光合作用直接或间接地为草食性动物和肉食性动物提供能量。一些昆虫的发育与空气中的湿度密切相关。总之, 水是生物生存必不可少的条件, 没有水便没有生命。长期干旱的沙漠地带, 生物的分布就很少 (图 10-3b)。

生态系统的全部能量都来自于太阳能。在陆生环境中, 植物可通过增加水平分布以获得更多的阳光。在海洋与湖泊等水环境中, 太阳的光照强度和透过水体的深度对于藻类生物的生长和分布具有重要的决定作用, 藻类生物的光合作用大都发生在靠近水体表层的区域。光强对水体中浮游藻类的生长是至关重要的因素, 在一定范围内, 光强越大, 浮游藻类生长越快, 但超出了这个范围, 增加光强并不能促进浮游藻类的生长, 这一现象称为光饱和现象 (light saturation), 这一光强范围的最高点称为光饱和点 (light saturation point)。不同的浮游藻类, 其光饱和点不同。光强低于光饱和点时, 光能可充分被利用; 光强超过光饱和点时, 随着光强的增加, 光能利用率逐步下降。除了浮游藻类外, 光饱和现象在所有绿色植物中都存在。另外, 光的波长对所有绿色植物的光合作用效率也会产生重要的影响。

全球的气候特征主要是由太阳能的输入和地球在宇宙中的运动决定的。由于地球的曲面性质, 其表面各处太阳光照是不均衡的 (图 10-5)。在地球赤道附近, 太阳光线直射地面; 在远离赤道的地方, 太阳光线斜射地面, 因此造成了地球表面各处温度差异较大。地球以一定的倾斜角度自转并围绕着太阳公转形成了季节和温度的变化。在全球范围内, 气温高的地区 (如热带) 最高温可达 40℃ 以上, 气温低的地区 (如南极和北极) 最低温可达 -50℃。在海洋表面, 除遇暖流或寒流外, 气温变

化和地球的纬线基本平行，温度从赤道向极地递减。

地球表面温度不均衡是造成空气运动和降雨的主要原因。当空气变热，它就会上升，同时吸收更多的水蒸

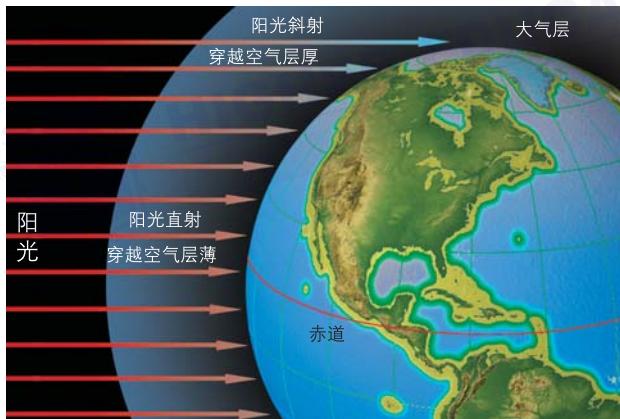


图 10-5 地球表面太阳光照和温度差别很大 太阳光的入射角随纬度的增大而增大，赤道地区太阳直射地面，能量分布集中，因而单位面积获得的能量多，气温较高；相反，高纬度地区由于太阳斜射，太阳光的能量分布在较大的地球表面上，单位面积获得的能量少，气温较低。另外，进入大气圈中的辐射必须通过空气层，纬度越高，光线入射角越大，穿越的空气层越厚，被反射的机会也随之增多，也会造成高纬度地区获得的太阳能量更少，导致气候更加寒冷。

气；当空气冷却，它便下降，同时失去水蒸气。于是，温暖潮湿的空气上升遭遇冷空气时便发生降雨过程。由于温度和降雨是影响植物生长和依赖于植被的其他生物生存最重要的生态因子，因此，全球大陆不同地区的气候类型也对应该地区的生物群落型（biome）。全球大陆按气候可以分成热带多雨气候区、干旱气候区、温暖气候区、北方寒冷气候区、高原气候区和极地气候区 6 类气候区（图 10-6）。相应地形成了全球大陆的 9 种生物群落型，它们是：热带雨林（tropical rain forest）、具稀疏乔木和灌木的稀树草原（savanna）、荒漠（desert）、极地冰原（polar ice）、浓密常绿阔叶灌丛（chaparral）、温带草原（temperate grassland）、温带落叶林（temperate deciduous forest）、针叶林（coniferous forest）、北极和高山冻原（arctic and alpine tundra）群落型（图 10-7）。

除了上述 9 种陆生生物群落型以外，由淡水生态系统和海洋生态系统构成的水域生物群落型占据了地球表面更大的面积。水域生物群落型主要包括湖泊与池塘、江河与溪流等淡水生物群落型，还包括入海河口、潮间带、大洋开阔海区和珊瑚礁等海洋生物群落型。水域生物



图 10-6 全球 6 类气候区 全球大陆按气候可以分为如图所示的 6 类气候区。极地气候区主要分布在北半球亚欧大陆和北美大陆大约北纬 60 度以北的地区和南极大陆。北方寒冷气候区处于极地气候区以南，大约跨越 20 个纬度。高原气候区是零星分布于全球各大高原山脉区，如亚洲的青藏高原、欧洲的阿尔卑斯地区、南美安第斯山脉和东非的乞力马扎罗山脉等。温暖气候区主要分布在温带相对湿润的地区，如我国长江以南，欧洲的地中海沿岸等。干旱气候区主要在温、热带降雨相对较少的地区，如中西亚、北非沙漠、美国中西部等地区。热带多雨气候区分布在亚洲东南部、非洲中西部及南美、大洋洲北部赤道附近地区。

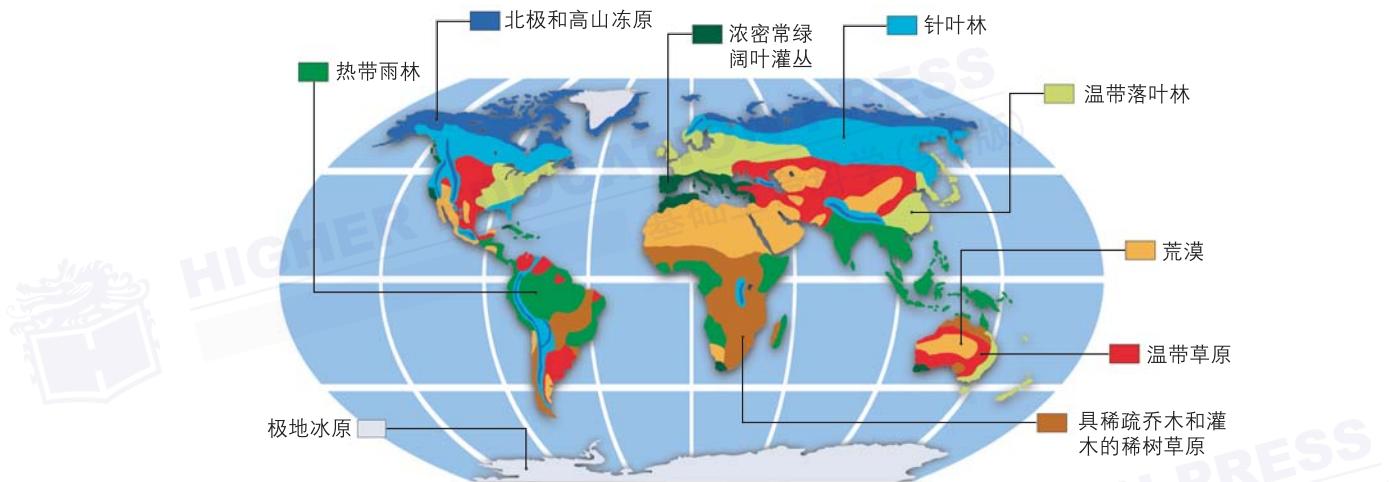


图 10-7 全球大陆 9 类生物群落型的分布 从总体上看，全球范围的地理环境是一个整体，但是各个地区由于所处的纬度位置、海陆位置等互不相同，分别有一定的热量和水分组合，以及有代表性的植被的土壤类型，在地球上分布成为不同的自然区域。由于温度和降雨是影响植物生长和依赖于植被的其他生物生存的重要生态因子，因此不同的气候区中生活着各有特点的生物群落型。全球大陆大致可分为如图所示的生物群落型。由于一个群落中的植物体现了群落的外部形态，所以这 9 类群落型也是依据植物的分布而分类的。各类生物群落的具体面貌请参见本章第三节的内容。

群落的生物组成主要取决于水的深度、阳光射入的深度（随透明度而不同）、到岸边的距离、水体的营养盐浓度、洋流的方向与温度和特殊的海底形貌与结构等环境因素。

三、环境与生物习性及动物的行为

环境的变化对生物产生的影响和生物对环境的适应性是生物与环境相互作用的结果。例如，在长期风向固定的环境中生长的植物其枝干的生长方向会与风向一致。科学家还进行了这样的实验，将一种温带生长的植物立即移植到一个较寒冷的环境，这种植物会受到严重的伤害甚至死亡；如果让这种植物经过逐渐的寒冷锻炼，即逐步降低其环境的温度，给它一个逐渐适应寒冷的过程后，再将这种植物移植到一个同样较寒冷的环境，该植物就可能不再受伤害或者伤害的程度被大大地降低了。以上的例子都是环境对植物习性影响的结果。与植物相比，环境对动物行为的影响则更加显著。动物的许多有规律的行为就是动物适应其环境定向进化的结果。例如，候鸟随季节的变化做长距离的迁移飞行来获得更有利的生存环境（图 10-8）。人体的生物钟现象显示了人的一些行为与环境周期性变化同步的节律。人们乘飞机做跨越世界时区的旅行时会产生时差反应，这种时差反应是人体的生物钟节律与环境周期性变化出现矛盾的结果。

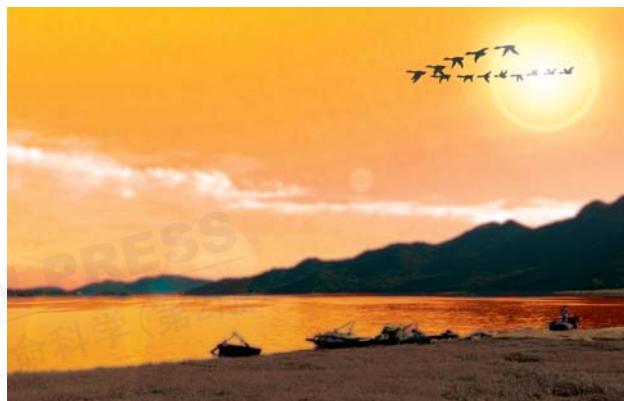


图 10-8 大雁东南飞 候鸟随季节变化作长距离的迁移飞行来获得更有利的生存环境，这是它们为适应环境而定向进化的结果。候鸟按迁徙情形的不同，可分为夏候鸟、冬候鸟和旅鸟。图中所示的大雁属于冬候鸟，它们在北方繁殖，秋季南迁至我国南方过冬，翌春返回原栖地。大雁的队伍常成“一”字或“人”字形。“一”字长行的头一只大雁和“人”字双行交叉处的头雁是雁群的领队，它拨云开路、引导方向、侦察敌情。由于路程遥远，大雁除靠翅膀飞行以外，还要利用前面大雁飞过造成上升气流滑翔前进，因此它们需要排成“一”字或“人”字两种阵式。

大部分动物都具有捕食和消化功能、具有神经系统和运动的能力，它们对外界环境的变化能够作出反应，动物的行为与环境的关系是生态学领域的重要研究内容，于是出现了生态学的重要分支学科——行为生态学 (behavioral ecology)。在特定环境中，动物决定在何处生活，

如何选择和寻找所需要的资源(包括食物),如何逃避天敌(捕食者),如何应对竞争者,如何与自己种群内的其他动物相处等等都属于行为生态学研究的范畴。动物的许多复杂应变行为体现了物种内和物种间特殊的生态关系。例如,一些动物具有伪装色,便于突然攻击和捕获其他动物作为自己食物。有些动物具有保护色,便于躲避捕食者。一些动物,如东非的角马群居生活并集体大规模迁移,不断寻找新鲜繁茂的草地,同时可以抵抗凶狠的捕食者——狮子。动物异性间的吸引等生殖行为,动物生存领地的选择、划分和争夺行为,蜂、蚁、猴等动物等级化的社会组织行为等等都是环境对生物行为影响的结果,是行为生态进化现象。

动物的行为(behavior)是动物个体或群体有规律或成系统的作用及活动现象。按照其功能一般可归纳为定向行为、社群行为、繁殖行为、通讯行为、节律行为、防御行为和攻击行为等。动物的行为可以是先天的或本能的,也可以通过学习与记忆获得。例如,婴儿的第一次微笑,小狗看见食物流口水等都属于本能的条件反射行

为。通过简单学习与记忆获得一种有规律行为的例子很多,印记(imprinting)是其中最典型的一例。印记学习一般只发生在动物出生后的幼年阶段。动物行为学研究专家很早就发现,刚孵化出生的小鸡、小鸭或小鹅往往都会跟着其他移动的物体或生物行走(图10-9),而且会对后者产生依恋。进一步研究还发现,许多动物物种印记学习的敏感期都在幼年,这种早期的印记对其以后生长阶段的行为会产生一定的影响。

为什么动物的个体或群体会发生有规律或成系统的作为及活动现象呢?科学研究显示,引起动物行为最主要的因素除了生态环境的影响和刺激外,还在于生物与环境长期相互作用和进化过程形成了这种行为的生理和遗传基础。例如,科学家已经发现,激素对动物的行为有明显的激活效应;动物细胞的一些特定基因对于某种行为是必需的。

第二节 种群生态

种群生态学是研究影响种群大小和密度、种群增长和种群结构特征等因素的生态学分支学科。种群是在特定时间和空间中同一种生物个体的组合。种群内的个体通过自然繁殖产生遗传性稳定的后代。种群的边界一般都是自然形成的,但生态学家为了研究的需要,常常根据研究的性质和要求对某一种群的边界做出界定。例如,生态学家为了研究大熊猫的繁殖,可以把大熊猫种群的范围界定在我国四川某一竹林茂密的山区;传染病学家为了研究艾滋病毒在人群中的感染和传播速率,可以在一个国家内或者在全世界范围内对艾滋病毒种群的增长和传播进行跟踪研究。无论我们如何界定种群的范围,一些种群的结构和增长的原则对于种群生态学的研究具有普遍的指导意义。

一、种群的结构

种群的大小是指种群内个体数量的多少,单位面积或体积中个体的数量称为种群密度(population density)。种群密度是反映种群结构的重要特征参数。在测定某一地区某种生物的种群密度时,例如我们要测定北京郊区的一种蜘蛛的种群密度,我们往往不可能对该地区的所有蜘蛛逐一计数。大多数情况下,生态学家以 m^2 或 km^2 为单位随机选定若干个样方(sample plot),通过对样方



图10-9 印记是动物最简单的一种学习行为 刚孵化出生的小鸡、小鸭或小鹅会跟着其他移动的物体或生物行走,而且会对后者产生依恋。刚孵化出壳后的雏鹅如果先与人接触,它们总是排着队依恋和追逐当初它接触过的人,而不认自己的鹅父母。



图 10-10 野外拉样方采样进行种群结构的研究 为了测定某地区某种群的密度,一般不可能采用直接计数的方法。大多数情况下,可以以 m^2 或 km^2 为单位随机选定若干样方,在样方中计数全部个体,然后以其平均数来估计种群整体。样方个数越多,空间分布越广,估计就越准确。在采样统计中,一定要注意样方必须具有代表性,另外计算最后还要用数理统计法估计变差和显著性。

中该物种的计数来统计和计算整体区域的种群密度(图 10-10)。

另一种研究野生动物种群结构的采样技术叫**标记-再捕捉方法**(mark-recapture),研究人员在界定的区域内随机设置陷阱或张网,对首次捕捉到的某一种群动物计数并全部用标签、染料等进行标记,然后放生。几天或几周后这些被标记的动物个体与种群内的未被捕捉标

记过的其他动物个体随机混合达到均匀分布后,再一次在界定的区域内随机设置陷阱或张网,对捕捉到的经标记的和未被标记的该种群动物个体分别记数,通过以下公式,便可估算出该种群的数量(N):

$$N = (M_1 / M_2) \times T_2$$

N : 种群个体数量

M_1 : 首次捕捉到(并标记)的个体数

M_2 : 第二次捕捉到的个体总数中已经被标记的个体数

T_2 : 第二次捕捉到的个体总数

由于一些特殊的原因,如被标记放生的一些动物逃离了该地区,上述估算种群数量的方法就会与实际情况有很大的误差。

除了调查种群密度外,认识种群的结构特征还需要了解种群的**分布型**(pattern of dispersion)。种群分布型是指全部个体在种群界定范围内的空间分布类型(图 10-11)。**群集型**(clumped pattern)是自然界最普遍的一种种群分布类型,这些种群的个体都相聚成群,如芦苇集中在湖滩生长、蚂蚁成窝、鱼苗成群结队游动等等。种群的群集型分布的原因在于环境中有利生存的地理条

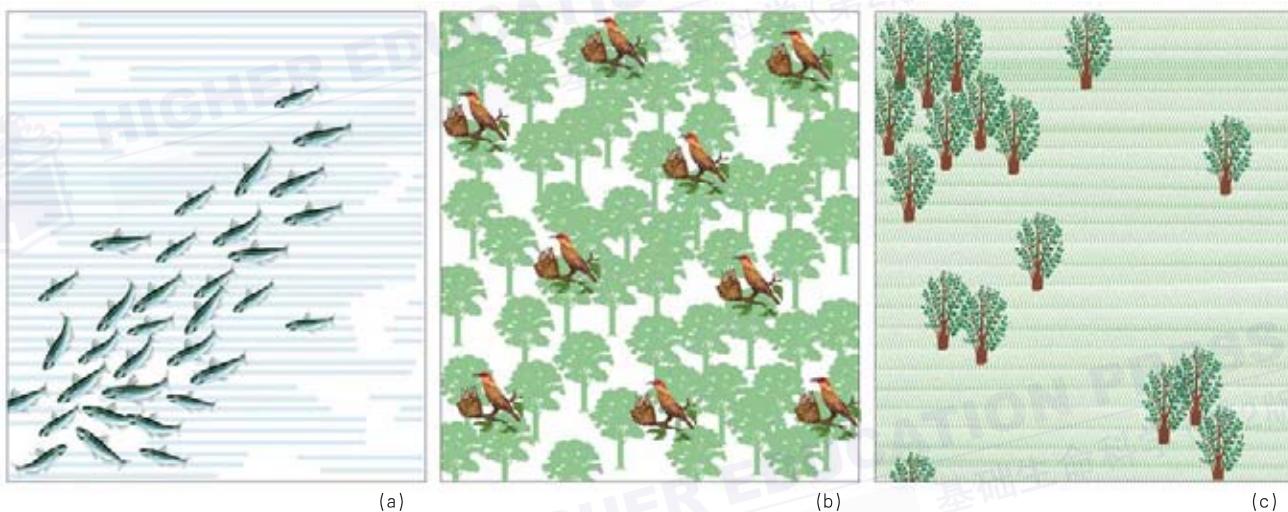


图 10-11 3类种群的分布型:群集型、均匀型和随机型 种群分布型是种群的结构特征之一。种群分布型是指全部个体在种群界定的范围内的空间分布类型。(a)群集型是动植物对生活环境差异发生反应的结果,如鱼苗成群结队的移动,某些昆虫以及人口分布等都属此类。(b)均匀型分布是由于种群内部成员间进行种内竞争引起的,如鸟类占据各自的树木筑巢,以及树木争夺根部空间、沙漠植物争水等。(c)随机型分布只有在资源分配不是限制性因素,且种内个体既不吸引又不排斥时才发生,如某些草种和森林树种的随机分布等就是这种情况。



图 10-12 种群年龄结构和存活曲线类型 (a) 种群的年龄结构主要有增长型、稳定型和衰退型3类。处于增长型的种群出生率高，后继世代种群数量总比前一世代高，年龄结构呈金字塔型，处于稳定型的种群出生率与死亡率相当，年龄结构呈钟型；处于衰退型的种群出生率下降，年龄结构呈瓮型。(b) 以某一种群存活个体的年龄为横坐标，存活个体数量为纵坐标作图，得到种群的存活曲线。存活曲线一般有3类：(1) 凹型曲线，幼年时死亡率很高，如墨鱼；(2) 倾斜直线型，各年龄段死亡率基本相等，如水螅；(3) 凸型曲线，在接近生理寿命前只有极低的死亡率，如人类。实际上，很少有生物完全符合这三种曲线中的某一种。即使是同一种生物种群，它的存活曲线也会随生存环境不同而改变。

件分布不均匀，或者更有利于交配与繁殖后代，或者有利于相互合作等等。**均匀型** (uniform pattern) 的种群分布类型是种群中个体相互作用、争取获得更大空间和更多资源的结果。例如荒漠中的植物为获得更多的水分和养分，大多散生在各处；正在营巢的鸟类也相互拉开距离，各自占据一定的地盘和活动空间。另一类**随机型** (random pattern) 分布出现在各个体之间既不相互排斥、也不相互吸引的种群内，即各个体的分布不受其他个体的影响（图 10-11）。

一些生物的分布随昼夜和季节的变化而变化。例如大多数动物白天活动，夜晚栖息。蚊、蛾、萤火虫、猫头鹰等动物则夜间活动，白天潜伏。一些水生浮游藻类白天分布在水体的表层进行光合作用，夜晚则下沉。这些都体现了种群的分布和结构特征。

种群的年龄结构对种群数量的变化具有很大的影响，种群的年龄结构从生态学的角度可以分成增长型、稳定型和衰退型3类（图 10-12a）。种群的性别结构和生存能力的性别差异也是种群结构的一个方面。大多数生物种群都倾向于1:1的性别比例。动物出生时一般雄性多于雌性，随着年龄的增加，雄性的死亡率往往高于雌性，造成这一结果的原因则十分复杂。

自然界中，各种生物的生存策略影响着该物种的生存和年龄分布，也反映了种群结构的重要特征。以某一种群存活个体的年龄为横坐标，存活个体数量为纵坐标作图，便得到了该种群的**存活曲线** (survivorship curve)。存活曲线表明了在一定年龄阶段的生存率。生存率的反义词是死亡率，指在单位时间内死亡的个体数量。有许多物种（如墨鱼、牡蛎等）在年幼时死亡率极高，它们

的存活曲线呈凹形；有一些物种（如水螅），它们在中年的死亡率和幼年或年老时相等，物种的存活曲线呈一条斜直线；发达国家的人口存活曲线呈凸形，在开始生存率很高，接着缓慢下降直到一个特定的年龄阶段（对人类来说大约是 60 岁），以后死亡率才开始迅速上升（图 10-12b）。绝大多数种群的真实存活曲线是这3种类型的组合，它们兼有凹形、线形和凸形3个阶段。比如大多数鸣禽，在幼年有较高的死亡率；在中年，它们被天敌捕获或发生意外死亡的机会与他们的实际年龄无关，因此是线形的；到了老年，死亡率增加。许多植物有相似的格式：萌芽时期高死亡率；然后是很长时间的低死亡率；紧接着迅速老化。

二、种群增长特征

种群内个体数量是如何增长的？让我们先来考察一下培养液中大肠杆菌 (*E. coli*) 的**指数增长模式** (exponential growth model)。在最适宜的条件下，比如在一个富营养的肉汤里，*E. coli* 每 20 min 就增长一倍。20 min 后，一个细菌裂殖成 2 个细菌；再过 20 min，2 个又裂变成 4 个，再过 20 min 又成为 8 个；即 $2^0, 2^1, 2^2, 2^3, 2^4, 2^5, 2^6, \dots$ 依此类推。我们说这种细菌的**繁殖周期** [又称为**世代时间** (generation time)，即繁殖 1 代所需要的时间] 为 20 min（图 10-13 a）。可以用下面的公式来计算一定时间里细菌的数量 (N)：

$$N = 2^t$$

在这个公式中， t 是指数，代表共繁殖了多少代。细

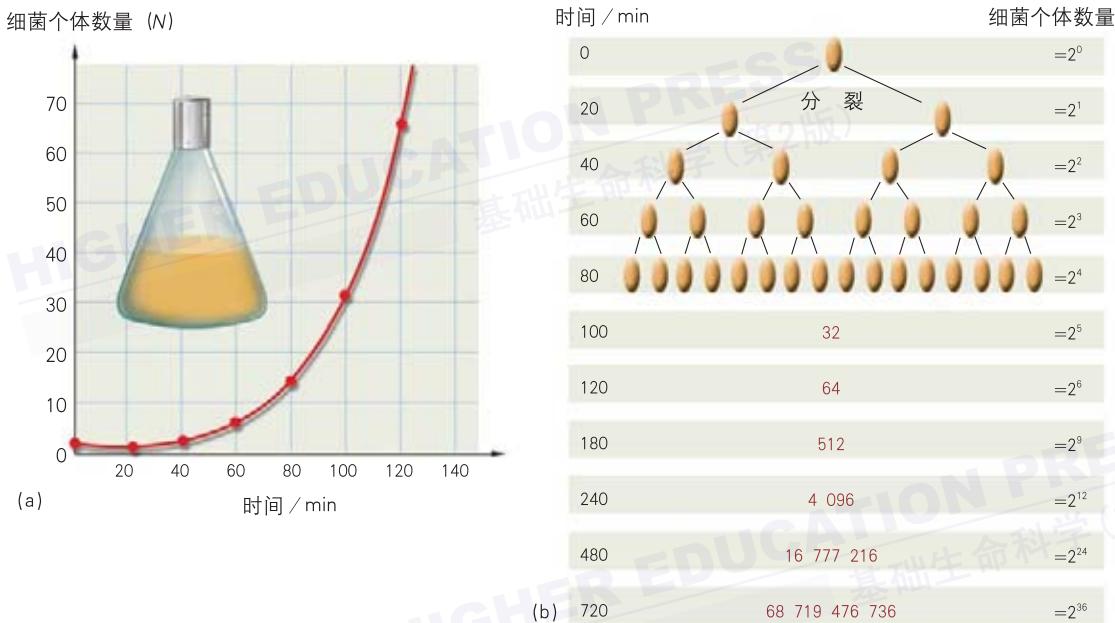


图 10-13 细菌种群的指数增长 在培养大肠杆菌时, 随培养时间延长记录下大肠杆菌数量的变化, 在没有限制的理想状况下, 发现大肠杆菌的数量每增长一倍需要 20 min。利用数学计算可推得大肠杆菌的数量 (N) 与培养时间 (t) 的关系满足 $N = 2^t$ 的函数关系。

菌的指数增长就是个体数量经过一定周期就会加倍的增长。指数增长意味着个体数量越大, 增长速度越快。例如, 16 个 *E. coli*会在 20 min 内增长成为 32 个, 即数量在 20 min 内增长了 16 个。但是 1.6×10^8 个 *E. coli* 在同一时间 (20 min 内) 也增长一倍, 亦即增长了 1.6×10^8 个。

以时间为横坐标, 个体数量为纵坐标作图, 细菌的增长曲线像一个“J”字母, 所以被称为“J”曲线。在曲线底部个体的数量增长得很慢, 然后加速。如果没有任何限制, N 会增长得越来越快, 一个细菌经过 12 h 共 36 代繁殖, 在理论上可以增长到 68 719 476 736 个 (图 10-13b)。

我们可以这样描述这种细菌的持续增长: 在没有限制的指数增长中, 增长速度 (G) 与个体数量 (N) 成正比, 也就是说, 个体数量越大, 增长速度越快:

$$G = rN$$

上式中 r 是实际增长系数, 又称为实际增长率, 它与细菌本身的生长特性和培养条件相关。我们可以用细菌的出生速率减去细菌的死亡速率来估算 r 的数值。在实际过程中我们还可以通过以下方法来计算 r 的数值, 并可计算出世代时间。

因为 G 代表了种群的增长速度, G 还可表达为 dN/dt , 即任一无限小的变化时刻内 N 的变化, 指数生长可以用以下微分方程来表示:

$$G = dN/dt = rN \quad (1)$$

(1) 式还可表达为:

$$(dN/dt)/N = r \quad (2)$$

(2)式的含意是, 在一定的物种与环境条件下, 处于指数生长期任一时刻个体数量的变化与该时刻的个体数之比永远是一个常数 r , 实际增长率常数 r 反映了对数生长期个体增殖的程度, r 越大, 说明增殖越快。

如何测定计算指数生长期的 r 值呢?

首先将 (1) 式转换为:

$$dN/N = r dt \quad (3)$$

如果 N_1 代表时间 t_1 时的个体数, N_2 代表时间 t_2 时的个体数, 对上述 (3) 式两边积分, 得:

$$\int dN/N [N_1, N_2] = r \int dt [t_1, t_2] \quad (4)$$

$$\because \int dx/x = \ln x + C$$

∴ (4) 式可转换为:

$$\ln(N_2/N_1) = r(t_2 - t_1) \quad (5)$$

$$\text{或: } r = (\ln N_2 - \ln N_1) / (t_2 - t_1) \quad (6)$$

例如, 已知培养瓶中的某种微藻从第 4 天到第 9 天为对数生长期, 在培养后的第 5 天, 全部藻细胞的计数为 5×10^3 , 第 7 天细胞计数为 1.5×10^4 , r 值计算如下:

$$\begin{aligned} r &= (\ln N_7 - \ln N_5) / (t_7 - t_5) \\ &= (\ln 1.5 \times 10^4 - \ln 5 \times 10^3) / 2 \\ &= 0.5493 \end{aligned}$$

已经算出了 r 值, 接着便可计算世代时间。因为世代时间就是种群增长过程中个体生活史中的某一点到下一代个体生活史的同一点所需的时间, 是个体数翻倍所需的时间,

$$\text{根据 } \ln N_2 - \ln N_1 = r(t_2 - t_1)$$

$$\ln(N_2/N_1) = r(t_2 - t_1)$$

∴ 个体数加倍, 即 $N_2/N_1 = 2$ 时 $t_2 - t_1$ 便是世代时间 T_g

$$\therefore \ln 2 = r T_g$$

将 $\ln 2 = 0.693$ 代入

$$\text{得: } T_g = 0.693/r$$

$$\text{因此, } T_g = 0.693/0.5493 = 1.2618 \text{ (天)}$$

r 值越大, 世代时间越短, 个体生长越快。在种群实际生长过程中, 我们总是要在不同的时间里多次测定个体的数量, 因此在指数生长期, 我们就有 $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$ 等时刻和相应的 $N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6$ 等一系列的个体数量值。由于实验误差和测定值 N 的随机误差, 在指数增长期内任意取两点算出的 r 值都与另取其他两点算出的 r 值不相同, 相应列出的增长曲线方程也不相同, 因为按上述的两点得到种群增长曲线是不精确的。借助于计算机, 将 $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$ 和相应的 $N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6$ 等数值代入标准指数曲线方程进行拟合, 便很容易解决这一问题。计算机还能自动给出回归分析的估计方差及估计标准误差 (进一步学习该部分内容可参考数量生态学的相关专著)。

必须指出, 指数增长模式只是一种理想的状态, 因为任何种群的生长都存在一定的限制因子, 特别当种群

数量增大到一定程度后, 这种限制作用会更加明显。因此, 在自然界中, 种群内个体数量的增长并不符合这种指数增长模式。即使在实验室里以最佳条件控制细菌的生长, 指数增长也不能维持多久。因为细菌即使是在一个很理想的环境中增长也会很快受到环境因子的限制, 如细菌逐渐消耗完了培养液中的营养, 细菌的密度增大意味着生存空间减小, 而它们的代谢排出物已经在毒害它们自身。如果我们完整地观察细菌实际增长曲线, 可以看到其生长曲线分为三段: 最初的阶段, 个体数量的增长在加速, 这时细菌的增长符合指数增长模式; 然后是减速阶段, 这时细菌的增长已经不符合指数增长模式; 第三阶段, 细菌增长的速度最后降下来, 细胞分裂所增加的数目与细胞死亡的数目相等, 即细菌的增长与死亡达到动态平衡。以培养时间为横坐标, 细菌个体的数量为纵坐标作图, 细菌种群的增长曲线像个倾斜伸展的“S”字母 (图 10-14a)。

观察这个“S”形曲线可以发现, 个体数量越大, 即 N 越大, 减速就越快。我们取“S”曲线的峰值用 “ K ” 表示, 并定义为环境对一物种的最大承受容量, 它是环境所能承受或者养活的最大的个体密度。 K 也可描述一个栖息地实际能承担的个体数目的极限值。当一个环境还没有达到它的承受容量, 仍然有一部分 K 可以留下来被填充。例如, 北京郊区东灵山的一种蜘蛛每平方米最大容量是 100 只 ($K = 100$), 当每平方米个体密度 N 是 70 只, 那么便留下了 30% 的容量。生态学家用下述公式来描述自然界种群的增长速度随时间的变化:

$$G = rN(K-N)/K$$

该种群增长模型又称为逻辑斯蒂增长模型 (logistic growth model), 它反映了许多物种在限制条件下的生长: 随着个体数量增长, K 的空余部分减少, 种群的增长速度随之降下来。当个体数量达到最大承受容量, 环境不能负担更多的个体, 这时 K 的空余部分为 0, 个体数量停止增长, 即达到零增长。将这个公式绘制成图形 (图 10-14b), 它与上述 *E. coli* 的 S 曲线图形 (图 10-14a) 正好吻合。在开始阶段它与指数增长模型基本吻合, 因为在种群密度很小的特定的时间内, 环境中承受容量的剩余空间很大, $K - N \approx K$, 根据 $G = rN(K-N)/K$ 公式, $G = rN$, 因此相当于指数增长公式。

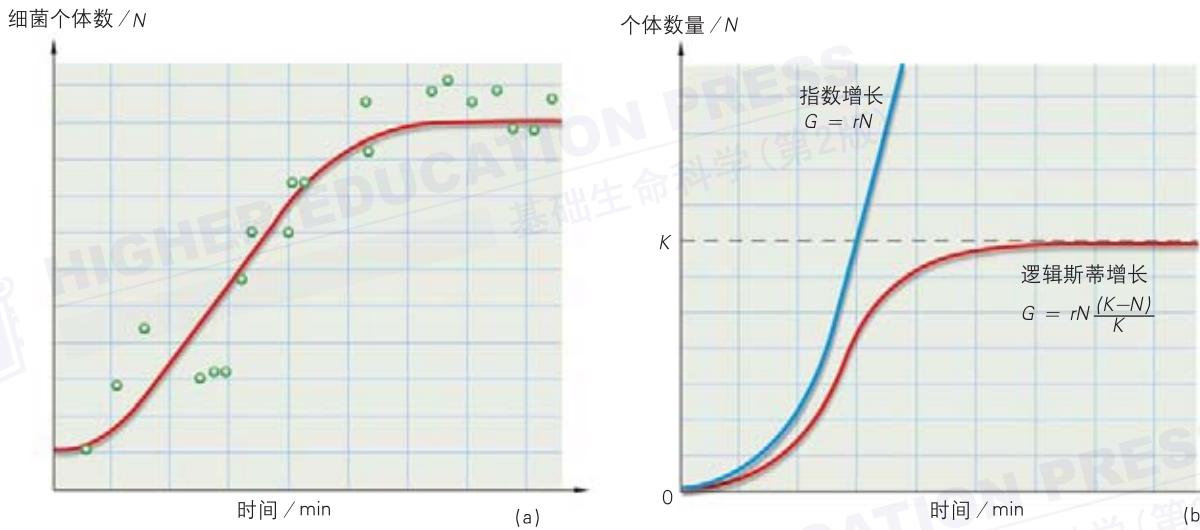


图 10-14 在生长限制因子作用下种群个体数量的增长 (a) 在实验室中, 完整地记录下细菌的实际增长过程, 并以时间为横坐标, 细菌个体数为纵坐标拟合曲线, 会发现实际的增长曲线是呈“S”型的。在最初阶段, N 很小, 资源充沛且相互影响小, 基本与指数增长曲线吻合; 但在中间阶段, 资源的有限与相互间的竞争使增长明显减慢; 最后阶段, 增速最终减慢到零, 种群数量达到环境的最大容纳量。(b) 在环境限制因子作用下种群的逻辑斯蒂增长模型, 即以 $G = rN(K-N)/K$ 理论公式作图, 得到的曲线与图 10-14a 的试验曲线非常吻合, 说明它能够比较真实的反映种群增长地实际过程。

三、种群增长的调节

环境对一个种群的承受容量决定于这个种群对环境的需求和该物种繁衍的各种决定因素: 营养、食物、领地、天敌和竞争者等等都属于密度相关因素, 即种群的密度越大, 环境因子的限制就越强。高密度群体能够迫使生育或繁殖速度下降。高密度也能造成个体移居, 并且限制外来个体移入。另外, 高密度能增加天敌的作用。病虫害、竞争、移居等都会制约个体密度。密度越高, 种群增长得越慢。

一些物种的个体数目还受制于密度无关因素, 例如火灾、干旱、暴风雨、旋风、火山爆发和其他一些自然灾害。如果种群密度的变化是由于密度无关因素造成的, 那么上述的种群增长模式就不适用于种群密度实际变化的情况。

在自然界正常情况下, 大多数种群个体的数量基本都是稳定的, 种群的数量在环境承受容量 K 值上下波动, 任何种群都不可能无限制地增大, 例如海洋中鲨鱼种群的数量一般情况下都在环境承受容量的一定范围内波动(图 10-15a)。自然界中关于种群增长调节的实例有很多。圣马太岛位于美国的阿拉斯加之西, 过去一直被地衣覆盖。1944年, 这个小岛引进了29只爱食地衣的驯鹿。

到了1963年, 这29只驯鹿已发展成6000多只, 形成了一个庞大的种群部落, 并吃掉最后的几片地衣。在那年年底, 生长缓慢的地衣几乎从这个500 km²的小岛上消失。然后一个漫长的冬天来临了。到1964年, 几乎所有的驯鹿都在饥寒中倒下。春天来临时, 只有41只雌鹿和1只雄鹿存活了下来。尽管这些动物会依靠仅存的地衣艰难度过几年, 但已不可能再生育。它们一只一只死去, 小岛又回到了地衣的世界。过度增长的驯鹿没有得到有效的控制, 最终受到了大自然的惩罚, 其中有两个直接原因: 首先, 当地衣开始消失时, 驯鹿不可能离开这个岛去吃别的植物, 让地衣恢复生长; 其次, 这个岛上没有驯鹿的天敌来控制驯鹿的数量。驯鹿一味地繁殖直到全部食物被消耗光。在自然中, 我们会看到当一个物种刚占领一个领地时会这样无限制地增长, 如上文所说驯鹿被引入一个铺满地衣的小岛, 但最终物种数量会降下来并且很可能只留下很少的幸存者。

实际上, 我们发现尽管自然增长会或上或下地波动, 但是却出人意料地稳定。大部分物种的数量随季节而上下波动。生物因子和非生物因子都可能戏剧性地影响物种数量。在自然界中的一些物种个体总数总能长时间保持稳定。不过有些物种数量保持稳定的同时, 另一些物种却波动很大。

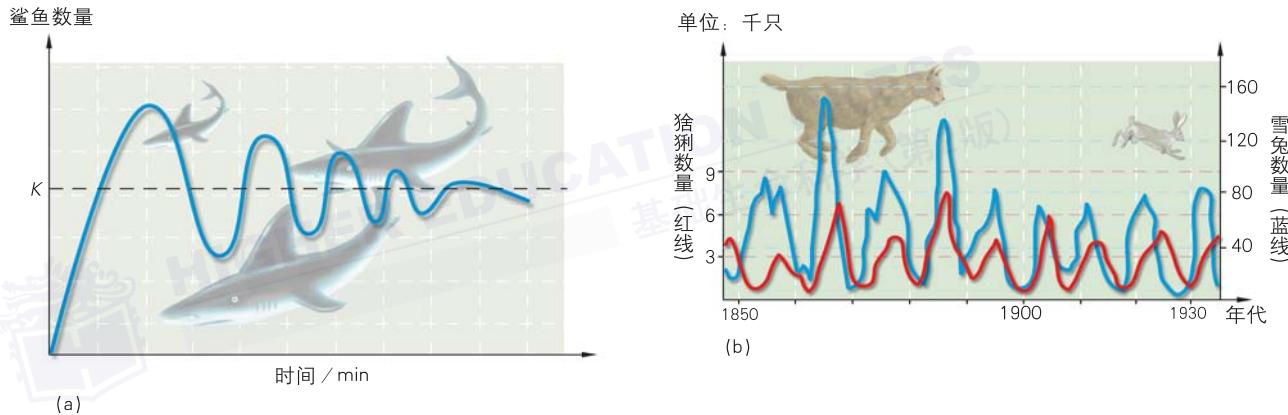


图 10-15 生物种群增长的调节 (a) 由于环境因子的限制, 鲨鱼种群的数量在 K 值上下波动。图中的鲨鱼种群数量基本是稳定的, 仅在 K 值上下小幅波动。其实任何种群都有自我调节的模式。这种调节是因为环境因子的限制(指营养、食物、天敌、领土、竞争者等因素, 不考虑少数的密度无关因素)是随种群密度增大而增大的。当种群数量超过 K 时, 环境限制因子也增大, 迫使种群增长速率下降甚至到负值, 这样种群数量出现回落; 当种群数量低于 K 时, 类似的机制也会使种群数量回升。(b) 雪兔和猞猁的种群大小变化与循环, 图中雪兔和猞猁的种群大小变化是天敌对种群数量控制的典型例子。每到雪兔数量增加时, 由于猞猁的可觅食物增加, 使猞猁的数量也随之增加。接下来, 更多的猞猁捕杀雪兔, 增加了后者死亡的速率, 因而又减少了猞猁的食物, 使猞猁的数量也随之减少。较少的猞猁对雪兔捕食的减少又可使后者的种群得到回升。如此周而复始形成循环。图中显示, 猞猁数量的实际变化曲线并不总是紧跟雪兔的数量变化曲线, 这可能是因为雪兔食物的多少也影响着它们的数量变化。

种群中个体数量的变化与其天敌有直接的关系。查看加拿大哈德逊湾毛皮业公司对雪兔及其主要天敌猞猁长达 200 年的纪录发现, 雪兔和猞猁数量变化的循环周期都是 20 年 (图 10-15b)。生态学家曾经将雪兔和猞猁的种群大小变化的平行发展解释成天敌对一个物种的数量控制, 即雪兔的数量越大, 猞猁的食物就越多; 于是, 猞猁的数量就越多。然后又产生了矛盾, 如此多的猞猁增加了雪兔的死亡率, 直到雪兔太少而不能维持这么多的猞猁。根据猞猁数量变化曲线并不是一致地落后于雪兔, 雪兔数量即使在没有猞猁的岛上也上下波动的现象, 另一些生态学家认为雪兔数量变化的循环除了与天敌猞猁相关外, 还更多地取决于它们的食物(一种可食植物)供应的情况。被捕食的动物并不一定能完全控制肉食动物的种群大小, 植物也不一定能完全控制食草动物的增长, 这就是自然界环境与生态因素的复杂性。

四、人口的结构和增长

在我们了解了种群的结构、增长和调节因素等一般原则以后, 让我们再来分析一下人类这一特殊种群, 即讨论人口的结构和增长等一般问题。在本章的最后一节, 我们还将进一步重点讨论人口、资源与环境的特殊问题。

据有关统计, 地球上每 20 min, 人类就增加 3 500 个新成员。同样在这平均 20 min 内, 地球上便有一种动物

或者植物绝灭。一方面是人口的急剧增加, 另一方面其他物种绝灭的间隔时间越来越短, 生物资源越来越短缺, 生态环境越来越恶化, 生态学家们相信, 这两方面趋势之间有着必然的关联 (图 10-16)。



图 10-16 大量的树木被砍伐, 以满足人口扩张的需要 由于人口的大量增长, 人类对农田的需求不断增大, 根据世界能源研究所估计, 每年大约有 $20 \times 10^{14} \text{ km}^2$ 的热带雨林被砍并转化为其他生物量较低的土地覆盖类型。由于森林是地球陆地上最庞大的生态系统, 也是地球上最大的生物基因库, 所以砍伐森林不仅将造成严重的水土流失和土地荒漠化, 还使其他物种绝灭的速度越来越快。因此, 物种的减少与人口增长有直接的关系。

我们已经知道，自然界中绝大多数种群都不遵照指
数增长模型。但是，几个世纪以来，人类这一种群的增
长却是按指数增长模型进行的。在最后一次冰期之前，大
约一万年前，世界人口只有500万。人们以采集野果、草
根、树叶以及狩猎为生。每一个地区人口都比较稳定，出
生和死亡处于平衡状态。在1650年以前，人口的增长十
分缓慢，那时地球上大约只有5亿人。以后从5亿人口增
长到10亿人口用了整整2个世纪的时间（1650—1850
年）。从10亿人翻倍到20亿则用了80年的时间（1850—
1930年）。再次翻倍达到40亿人只用了45年（1930—1975
年）（图10-17）。如果继续按照目前的增长速度，到2017
年，世界人口将达到80亿！近几个世纪以来，人类种群
个体增长体现了典型的指数增长模型。随着人类文明和
经济的发展，与早期人类社会相比，更好的营养、医疗
和公共卫生，降低了人的死亡率，增加了人的寿命，是
人口急剧增加的主要原因。人口的指数增长曲线与培养
瓶中细菌培养初期的指数增长曲线（图10-13）几乎完全
相同。按照生态学原则，细菌不可能无限制地繁殖下去，
从更长的时间尺度考察，人口的增长最终还是要遵守逻辑
斯蒂增长模型。

从全世界范围看，各个国家的人口增长速率差异很
大。一些发达国家如瑞士等，人口数量保持基本稳定，即
人口的出生率与死亡率基本相同。在一些发展中国家，如

斯里兰卡，由于不实行节制生育，人口的急剧增加带来了
住房、饮水和食物短缺等一系列的问题。近几十年来，
中国由于实行积极的计划生育政策，为控制全世界人口过
度增长作出了贡献。

与研究人口的结构和变化密切相关的学科是人口统
计学。人口统计和研究为经济、社会发展、保险与卫生
计划等的制定提供了最基本的依据。人口学家用一些统
计方法来描述人口。死亡率用来表示群体人口的死亡速
度，即1000人中每年死去的人数。同样，出生率可用来
表示群体人口中的出生速度，以每1000人中每年的新生
人数来计。人口学家用年增长率来表示人口增长，即人
群每年实际增长的比例。例如，2000年中国的人口年增
长率为1%左右。

人口的年龄结构分析也可以帮助我们预测不同国家
未来人口增长的趋势。从墨西哥与瑞士两国人口年龄分
布看，它们之间的差异非常大。墨西哥中低龄和育龄的
人口数量非常大，可以预测未来几十年将进入一个人口
急剧增加的时期。而瑞士中各年龄组的人数差异较小，
可以预测未来几十年其人口数量将保持持续的稳定。

预测人口增长的另一个方法是完全家庭尺度方法。
当一对夫妇正好能被两个孩子取代，这种生育叫取代生
育，在这个过程中总人口既不增长也不减少。今后几十
年内，如果中国每对育龄夫妇都保持只生两个孩子，或

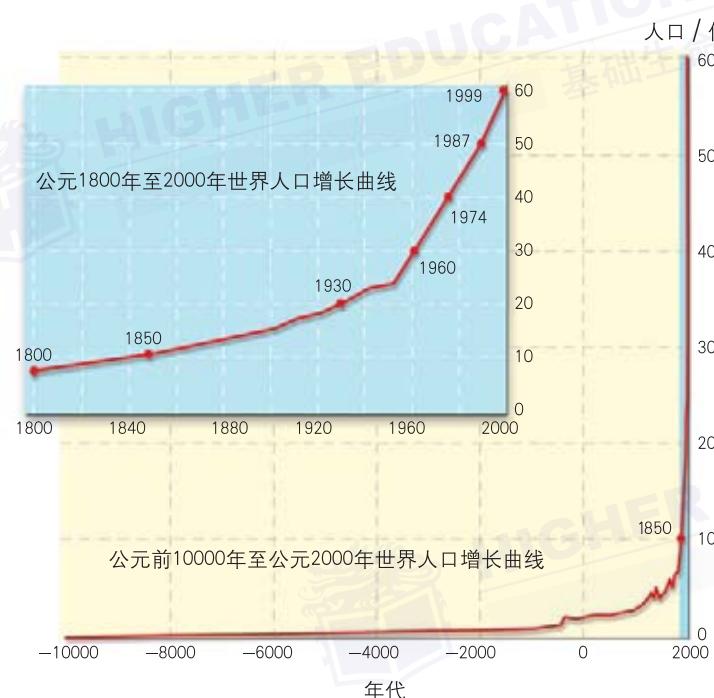


图10-17 地球上人口增长的历史 地球上人口增长的曲
线呈“J”型的指数增长，说明人口的增长没有受到应有的
限制，如果让地球的人口继续保持这样的增长速度，人类将
面临更大的人口危机，这对人类自身的生存是极大的挑战。

其中大多数夫妇只生一个孩子，中国的人口并不能完全被后代取代，这是因为人口惯性的作用。人口惯性的原因很简单，在一个快速增长的人群中，很大的比例是年轻人。即使他们的后代能在数量上恰好取代他们，他们仍会使世界人口增加。因为他们同他们的子辈以及他们的孙辈同时生活着，直到他们年届六旬后才进入死亡期。在低龄组和育龄组人口比例较大的情况下，人口出生的减少在短期内并不能降低人类种群的数量，这种人口惯性要持续大约50年左右。

第三节 生物群落

一、群落的基本特征与结构

当你漫步在校园中，仔细地观察周围的环境，你可能发现不同生物之间的相互关联和作用的现象随处可见。例如，喜鹊在大树上做巢，蜜蜂在花丛中采蜜，毛虫在啃食小树的叶片，蜘蛛张网在捕捉害虫，树荫处生长着蕨类植物等等。生态园中芸芸众生扮演着不同的角色，它们生活在一起，相互联系、相互依赖或相互作用，共同维持着生物王国和生态环境的和谐与平衡。多种生物共同生活在一起是自然界中的普遍现象。在一个特定的区域内由不同种类的生物种群组成了集合体，这些相互邻近的生物彼此之间以及它们与环境之间相互影响和作用。占据特定空间和时间的多种生物种群的集合体和功能单位被称为**群落**。群落具有一定的结构、一定的种类组成和一定的种间相互关系，在环境条件相似的地方可以出现相似的群落。

不同的环境存在着不同的群落，它们之所以不同是因为这些群落的基本特征不同。群落的基本特征包括物种组成、群落的结构、内部环境、优势种群、动态变化、各物种的相互关系、群落的稳定性等7个方面。

首先，一个群落含有多少种不同的植物、动物和微生物，列出它们全体的名录，即了解该群落物种的组成是认识群落特征的最基础的要求。

一个群落中的植物体现了群落的外部形态，只有在植物茂密的地方，才能为动物和微生物提供栖息的场所和充足的能量及营养。群落基本的外貌包括森林、草原、荒漠等。在此基础上还能更细致地划分群落外貌特征。群落的外貌特征还会随着季节的变化发生周期性的变化，特别是在四季分明的温带，群落的季相变化更加明显，

但由于其周期性重复，该群落仍然是稳定的。

组成群落的优势物种对群落的性质特征起着决定性的作用。群落内的优势物种一方面说明它最适应于周围的环境，另一方面它对其他物种和群落的整体环境影响最大。

了解了一个群落的物种多样性，列出群落中全部物种的名录只是认识群落特征的基础，进一步搞清群落中各物种的相对数量和比例，对于分析各物种间的相互作用和群落的发展变化趋势十分重要。例如，A、B两种森林群落都由4种木本植物所组成，但4种木本植物相对数量和比例却不一样。如果粗略地看图10-18，会以为A群落包含了更多的物种数量，但实际上A、B两种森林群落物种的数量是相同的，只是各物种的相对数量和比例不一样。考察群落内物种的多样性时还应分析各物种的相对数量。

群落的稳定性是指群落受到一定的外界因素作用后恢复到原来种群组成能力的情况。群落的稳定性取决于群落本身的特性和环境的相对稳定性两个方面。例如，由雪松为优势种的森林群落就具有较强的稳定性，因为它抗干扰的能力较强。

干扰是自然界中最普遍的现象，一些干扰是随机变化事件。并非所有的干扰都是有害的，现代生态学认为，中等程度的干扰有时有利于增加生物的多样性。

对一个群落的剖析可以从物理结构和生物结构两方面进行。群落的物理结构主要体现在其垂直层次上，陆地群落的分层与光的最大程度利用有关。土壤微生物、

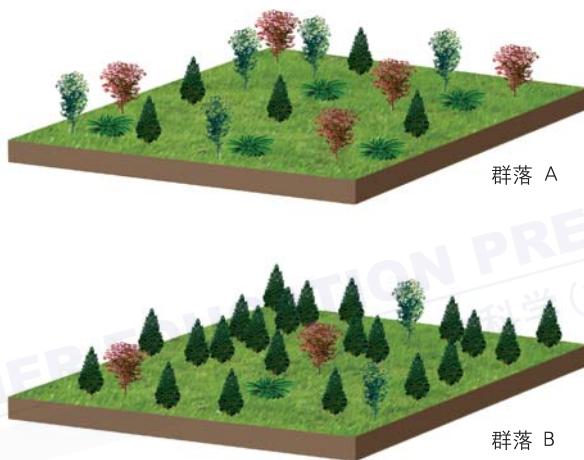


图10-18 两种森林群落 群落A和群落B的物种数量是相同的，但各物种相对数量比相差非常大，显然不是同一群落。

苔藓、草本植物、灌木和乔木自下而上分别配置在群落不同的高度上。相应于植物不同的层次，栖息着与之相适应的不同的动物。这种群落的垂直结构体现了多样性的生物最经济的太阳能利用和垂直空间的利用。其他群落如草原群落和水生群落也具有垂直结构，只是草原群落的绝对分层高度比较低。

群落的生物结构主要是指群落内各物种之间的取食关系（物种间的营养结构）和各自所处的位置，这种取食关系决定了物质和能量的流动方向，也决定了群落中各物种的相对数量和比例及其变化。群落中各物种的取食顺序所决定的物质和能量的流动方向通常为：植物→草食动物→肉食动物→顶级肉食动物。另外，微生物通常也可参与到上述关系的各个阶段，取食顺序及物质和能量的流动方向为：动植物尸体与有机碎屑→微生物→动物。

二、地球上的主要群落类型

在本章第一节我们了解到，地球气候因素和地理位置是生物分布的主要控制因素，形成了热带雨林、稀树草原、荒漠、极地冰原、浓密常绿阔叶灌丛、温带草原、温带落叶林、针叶林、北极和高山冻原等大陆生物群落。

水域生物群落包括淡水生物群落和海洋生物群落。以下分别对这些生物群落做简单的介绍。

热带雨林（图 10-19）主要分布在亚洲东南部、非洲中部和西部以及南美洲和大洋洲以北的赤道附近。那里通常气温高，降雨量大，因此植物繁茂。整个热带雨林的树种可达几千种。热带雨林的垂直分层明显，高大常绿的乔木为主构成的茂密森林下还有灌木层和草本层。有些热带雨林顶部的林冠层形成为一片巨大的“顶蓬”，使阳光很少能透射到最下层。如果某一棵大树老朽而断落，暴露出的空间很快便被其他快速生长的乔木填补。在热带雨林乔木的不同层次上通常还附生着许多藤本植物，更增添了热带雨林枝叶的茂密程度。热带雨林中分布最多的动物是灵长类、鸟类和各种昆虫。与其他陆生生物群落相比，热带雨林具有的生物种类最多。

稀树草原（图 10-20）按其英文发音还被称为萨瓦纳，主要分布在非洲、南美洲和大洋洲的热带季节性干旱地区。这些草地密布着大片的草本植物，一些草原以针茅、羊草、冰草、蒿草等为主。有些地方还散生着矮小的小片阔叶丛林。稀树草原栖息着许多草食性动物及它们的捕食者——肉食性动物，这些动物的种类很多，如野兔、斑马、长颈鹿、羚羊、野驴、猎豹、狮子等等，另外还有

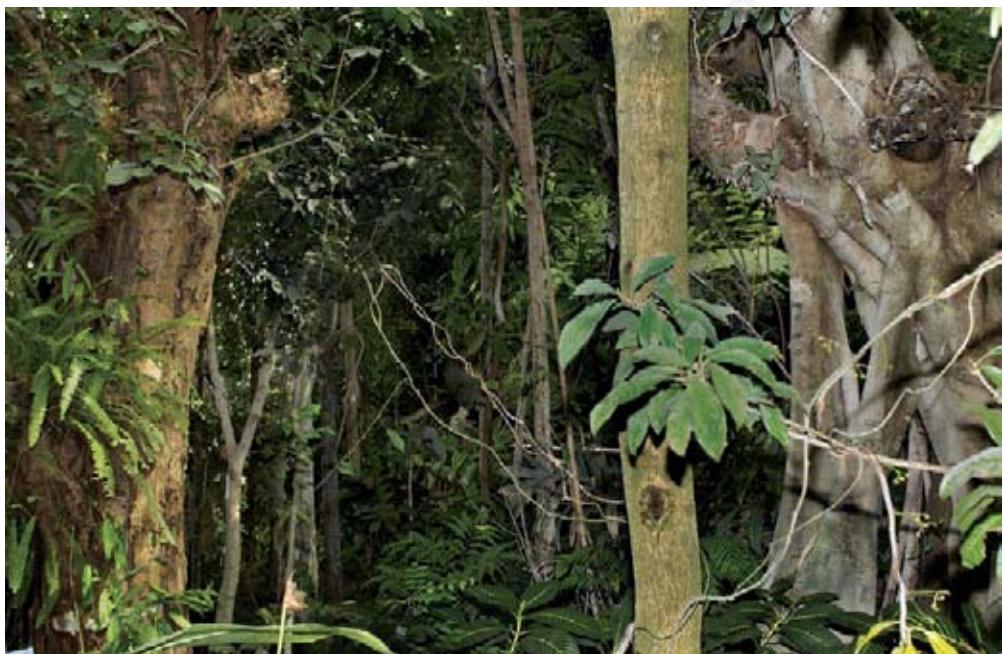


图 10-19 热带雨林 热带雨林中的植物种类多且茂盛。它主要分布在赤道附近地区，平均气温23.5℃左右，一年四季日照变化不大，降水充足。明显的垂直分层也是它的特点，植物一般为乔木、灌木和草本。热带雨林中的动物种群主要是灵长类、鸟类和各种昆虫。总体来说，热带雨林具有的生物种类在各主要群落类型中是最多的。



图 10-20 稀树草原 草原曾一度占地球陆地面积的 42%，但在农耕和牧业的压力下，退化到了现在的 12%。即使这样，草原生态系统依然是地球上很重要的陆地生态系统。图中所示的是稀树草原的生物群落，它们主要分布在热带季节性干旱地区。其中主要的植物群落是各种草本植物。动物种类有大量无脊椎动物及野兔、羚羊、斑马、长颈鹿、狮子等脊椎动物。

许多鸟类和蛇等爬行动物。影响稀树草原最主要的非生物生态因子是周期性的雨季和旱季。雨季来临时，生长茂盛的草原植物为各种动物提供了丰富的食物；旱季来临时，许多大型草食性动物常常要向水分充足的区域迁移。

沙漠是荒漠的一类（图 10-21），非洲的撒哈拉沙漠、中东的阿拉伯沙漠和中国的戈壁沙漠呈不连续的条状分布横贯非洲和亚洲大陆。地球上沙漠常年降雨量通常不足 300 mm。一些沙漠地表的温度白天可达 60℃ 以上，但分布在亚洲西部的一些沙漠气温却很低。沙漠地区植被较少，沙漠植物对干旱的主要适应是减少表面积，根系分布在沙土中最有利于吸收雨水的深度。多年生植物大多为具有肥厚块茎的仙人掌和仙人球类，一年生植物能在一个短暂的雨季里完成一个世代的发育，种子在干旱期间进入休眠。沙漠动物的种类也较少，包括骆驼、黄羊、沙漠兔等沙漠动物都发育形成了一些适应于干旱少水的特殊机能。

极地冰原终年冰雪覆盖，动物仅有北极熊、企鹅等少数以海洋动物为食物的极端耐寒性种类（图 10-22）。

灌木林在地球上的分布面积相对较小（图 10-23），主要发生在中纬度靠近海岸的地区，气候特征为冬季多雨，夏季干热。致密常绿的矮生灌木为优势种群。有些灌木林经常发生由于雷击和人类活动引发的林火。火灾后，这些灌木林树根能够再次萌发，又形成茂密的植被。

温带草原（图 10-24）主要分布在欧亚大陆、南美洲、北美等地，中国的黄河中游、内蒙古和东北大兴安岭以西也有大片的温带草原，属于温带大陆性气候地区的旱生草本植物群落。温带草原乔木很少，以草本植物为主。代表动物有羚羊、黄羊和各种鼠类等。由于温带草原土壤肥沃富含无机与有机营养，因此有利于发展畜牧业和农业。



图 10-21 沙漠的植被 荒漠是指水分蒸发量超过降水量的地区。图中的沙漠是一种典型的荒漠环境。沙漠生物种群由于严重缺水，表现出种类少，抗旱能力强等特点。其中的植物多为仙人掌、仙人球、丝兰和短命植物，而动物也只有骆驼、黄羊和沙漠兔等少数几种。



图 10-22 南极的企鹅 是典型的生活在终年冰雪覆盖的极地冰原上的极端耐寒性动物



图 10-23 浓密常绿阔叶灌丛(灌木林) 灌木林主要分布在冬季多雨而夏季干热的中纬度地区。灌木在进化上的成功使它在特定条件下有很大竞争优势,它可以只把较少的营养物分配到地上生物量而把较多的营养留在根中。另外,它们能分泌抑制草本植物生长的抑他素,使它们在与草本植物的竞争中占据优势。这种生物群落中的动物主要有鸟类、蜥蜴等。



图 10-24 温带草原 温带草原主要分布在欧亚大陆、南美和北美大陆的中纬度地区,那里的主要气候特征是每年有一个明显的干旱期。所以与稀树草原不同,这里的主要植物是旱生草本植物。它与稀树草原一样辽阔无垠。此生物群落的代表动物有羚羊、黄羊和各种鼠类。

温带落叶林(图 10-25)主要分布在北美、西欧、中欧的温带湿润海洋性气候地区,中国的华北和东北沿海地区也有温带落叶林分布。这些地区湿度较大,四季分明,雨水集中在夏季。温带落叶林以阔叶乔木为主,植物的种类很多,包括桦树、槭树、桃树、栎树等树种,也可混杂着一些松树和柳树等,林下还分布了各种灌木和阔叶草本植物。一些温带落叶林木材是制作家具的好原料。温带落叶林中优势的草食性动物是鹿,优势肉食性动物为黑熊。此外,林中还有多种多样的鸟类、爬行类动物和昆虫等。

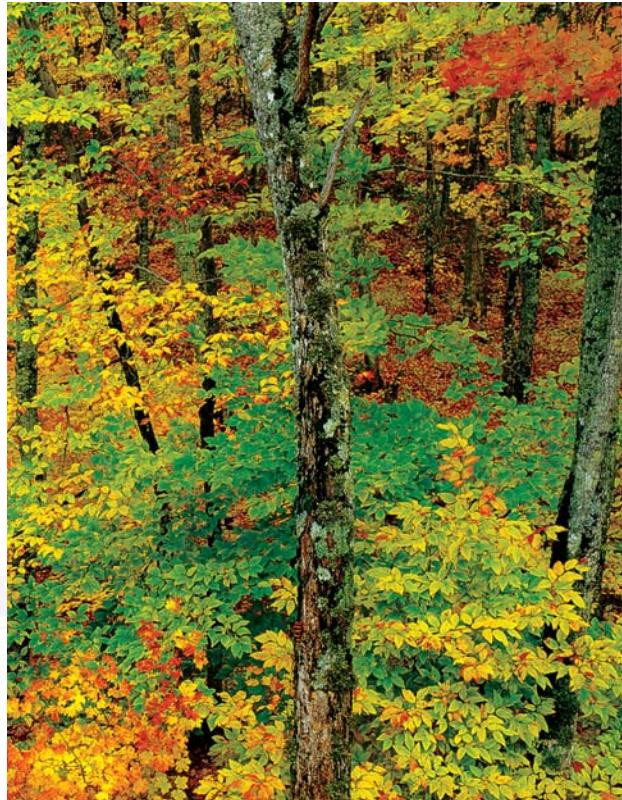


图 10-25 温带落叶林 温带落叶林是以温带阔叶乔木为主,分布在温带湿润海洋性气候地区。从结构上看,发育较好的和树龄参差不齐的温带落叶林通常可分为若干层。此生物群落中的植物中常包括桦树、槭树、桃树、栎树等树种,下层植物包括各种灌木和阔叶草本植物。草食动物的代表为鹿,肉食动物的代表有黑熊。

针叶林主要由常绿的针叶树如松、杉、柏等树种所组成,大部分针叶林分布在北半球高纬度的温带到亚寒带地区。中国东北的大兴安岭地区分布的便是典型的针叶林。针叶林是一些木材的主要产地。一般针叶林林下植被不发达,地表常被枯枝落叶所覆盖。生活于针叶林内的动物种类较多,如野鸡、松鼠、鹿、狼、熊和各种鸟类。针叶林中昆虫的种类也很多。

冻原又称为苔原,分布于北极圈以南环绕北冰洋的严寒地带,大约占地球陆地面积的 20%。由于气候严寒,降雨少,冻原区的土壤终年冻结。那里没有树木,典型的植物是地衣,偶然有很矮小的植物和苔草。冻原的动物也较少,有驯鹿、麝牛、旅鼠、北极狐和狼等。

淡水生物群落(图 10-26)包括溪流、河流、池塘、湖泊和沼泽等类型,其中的植物包括浮游藻类、漂浮植物和挺水植物,动物包括各种蛤、蚌、鱼、虾等。一些爬行类和两栖类动物大都栖息在沿岸地带。



图10-26 溪流和池塘 图中的溪流和池塘都属于淡水生物群落。淡水生物群落与陆地群落有较明显的差异，它的主要环境因素有水温、含氧量和透光量等。一般来说，淡水系统中上层氧气较丰富，而下层有较充沛的营养物质。淡水生物群落中的主要植物有浮游藻类、漂浮植物和挺水植物，动物包括各种蛤、蚌、鱼、虾等。

海洋生物群落根据位置和海水的深度分为海岸带、浅海带、远洋带和海底带等类型（图10-27）。不同的海洋带分布的海藻类植物和海洋动物的类群差别很大。海岸带可以经常看到海藻、海星、沙蚕、沙蟹和各种甲壳类动物。浅海带由于阳光射入和来自陆地较丰富的营养物质，具有较多的海洋生物种类和较高的生产力，是海洋资源最丰富的区域。远洋带海水的营养物含量少，生物生产力较低，但仍然有各种浮游藻类、鱼、虾等。远洋带受污染较少，相对面积大，总体资源量相当大。生活在海底带的生物与其他类型群落的种类差异很大，它们几乎全是异养生物，有海绵、软体动物、甲壳动物和棘皮动物等。

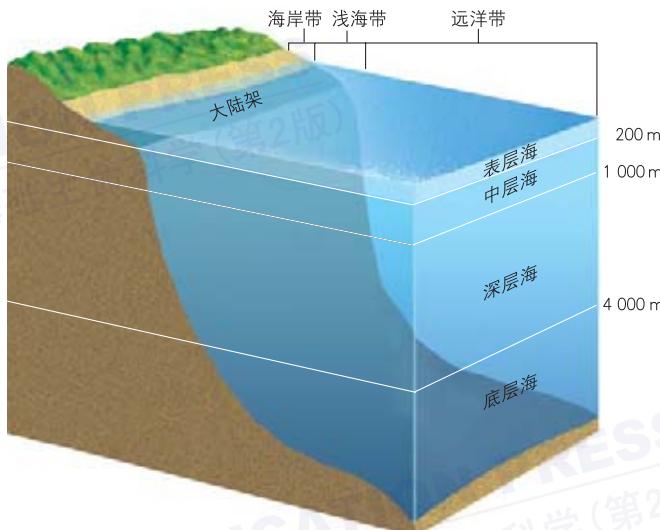


图10-27 海洋带和海洋生物 海洋占地球表面积的70%，整个地球上的海洋连成一体，海水具有流动性，因此地球上的全部海洋是一个巨大的生态系统。而海洋中的生物群落根据位置的海水深度的不同分为海岸带、浅海带、远洋带和海底带等类型。海洋中的植物以浮游植物为主，但不同的海洋带分布的海藻类植物和海洋动物的类群差别很大。其中浅海带由于太阳光强度大，有来自陆地的丰富的营养物质，具有较多的海洋生物和较高的生产力，是海洋资源最丰富的区域。海洋面积大，生物资源总量非常丰富。

三、群落内生物之间的相互关系

群落是在一个特定的区域内由不同种类的生物种群组成的集合体，从功能上看这些相互邻近的生物之间相互关系包括竞争、捕食、寄生和共生4种主要类型。所涉及到的两种生物可能存在以下状态：彼此互惠，一方受益一方无害，一方受益一方有害，仅对一方有害但对另一方并无益，对双方都有害，对双方既无害也无益。群落内生物之间的相互关系是复杂和多方面的，需要结合环境条件具体问题具体分析。

生活在同一区域的两个物种如果利用相同的资源，它们便形成了竞争的关系。阳光、水分、空间和营养物质等都是植物的资源，食物、水分和空间可以是动物的资源。由于对资源不平等的利用，两个物种竞争的结果会导致竞争利用资源能力较弱的物种种群数量下降，激烈的竞争甚至可导致一个物种从该区域完全被排除。

水环境中的营养盐浓度是藻类生长的主要资源和重要的环境影响因子，生活在同一个环境中的两种藻类竞争利用同一种营养盐时，竞争的结果可能导致一种营养

优势藻类生长更快，成为优势种群。

科学家在研究单细胞藻类营养吸收时，观察到微藻生长速率及其营养吸收速率在营养盐浓度增大到一定程度时有饱和现象。研究证明，当营养盐浓度很低时，随着浓度升高，微藻生长速率与营养盐浓度是正比关系，但进一步增加营养盐浓度，生长速率不再按正比关系升高，如果继续再加大营养盐浓度，微藻的生长速率会停留在一定水平不再升高，即呈饱和现象。于是，科学家们提出了一种微藻营养吸收与生长动力学方程来定量描述这一规律：

$$U = U_m [S / (K_s + S)] \quad (1)$$

U : 该微藻每天的特殊生长速率 (1/d)

U_m : 该微藻最大的特殊生长速率 (1/d)

S : 某种营养盐的浓度 (mg/L)

K_s : 营养吸收动力学常数(或半饱和常数)

根据该动力学方程，我们以 U 对 S 作图得到了微藻营养吸收与生长动力学方程曲线（图 10-28）。

当营养盐的浓度 S 很低时，该营养动力学方程(1)呈一级状态。即 S 在分母中被忽略后，每天的特别生长速率与该营养盐浓度呈线性正比关系：

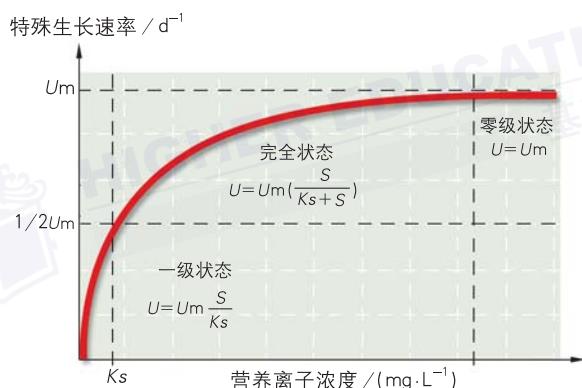


图 10-28 微藻营养吸收与生长动力学方程曲线 微藻营养吸收与生长动力学方程定量描述了微藻生长速率及其营养吸收速率随营养盐浓度变化而变化的规律。原方程是 $U=U_m[S/(K_s+S)]$ ，其中 U 表示微藻每天的特殊生长速率， U_m 是微藻最大的特殊生长速率， S 是某种营养盐的浓度， K_s 是营养吸收动力学常数(也称半饱和常数)。方程式基于下列研究结果得出的：①微藻生长速率在营养盐浓度增加达到一定程度时有饱和现象；②在低浓度下，生长速率与营养盐浓度大约成正比，但浓度增加时其增速会放缓。这些特点在曲线上都有相应的反映。

$$U = U_m [S / K_s] \quad (2)$$

当营养盐的浓度 $S >> K_s$ 时，(1) 式分母中 K_s 可被忽略，即 $S / (K_s + S) = 1$ ，营养动力学方程呈零级状态：

$$U = U_m [S / (K_s + S)] = U_m$$

这就是上述的营养盐饱和状态，此时微藻的生长速率与该营养盐浓度无关。

当 S 介于以上两种状态之间时，微藻相应的生长速率遵守该动力学方程的轨迹。这些分析说明，该动力学方程符合科学家观察到的营养盐浓度对微藻生长速率影响的规律。

另外，该方程及其参数还有如下意义：

(1) 当 $U = 1/2 U_m$ ， $K_s = S$

即 K_s 是微藻生长速率为最大生长速率一半时的特殊营养盐(离子)的浓度 (mg/L)。

(2) K_s 是微藻的特征常数，只与该种藻种有关，与营养盐(离子)浓度无关，每一种微藻对某种营养盐(离子)在特定条件下，即特定温度、光照、pH 等稳定平衡的状态条件下，都有一个特定的 K_s 值。

(3) $1/K_s$ 可以近似地表示该藻对某一种营养盐(离子)吸收速率和生长速率的快慢， $1/K_s$ 越大，表明吸收速率越快，生长越快，因为 $1/K_s$ 越大， K_s 就越小，达到最大生长速率和吸收速率所需要的该营养盐(离子)浓度就越小，即不需要很高的该营养盐(离子)浓度，该种藻就可以达到最大的吸收和生长速率。

通过上述微藻的营养吸收动力学方程，我们可以分析生活在同一环境中的两种微藻同时竞争利用某一种营养盐(如 K_2HPO_4)时可能出现的结果。营养吸收动力学分析发现，微藻 A 与微藻 B 对于利用其中某一种营养盐离子(如 HPO_4^{2-})的 K_s 值不同，分别为 K_{sA} 和 K_{sB} ，且 $K_{sB} > K_{sA}$ (图 10-29a)。

利用相同的培养液分别在两个培养瓶中培养 A、B 两种微藻，分别得到的生长曲线并没有显示出差别(图 10-29b)；A、B 混合培养时，如果 HPO_4^{2-} 营养离子浓度水平略低于 K_{sA} 值，却大大低于 K_{sB} 值，由于这时 $K_{sB} > K_{sA}$ ，微藻 A 对 HPO_4^{2-} 营养离子利用的效率更高，随着时间推移，竞争性利用 HPO_4^{2-} 的结果必将导致 A 逐渐成为优势种群，而微藻 B 的数量越来越少，最终被竞争所淘汰(图 10-29c)。

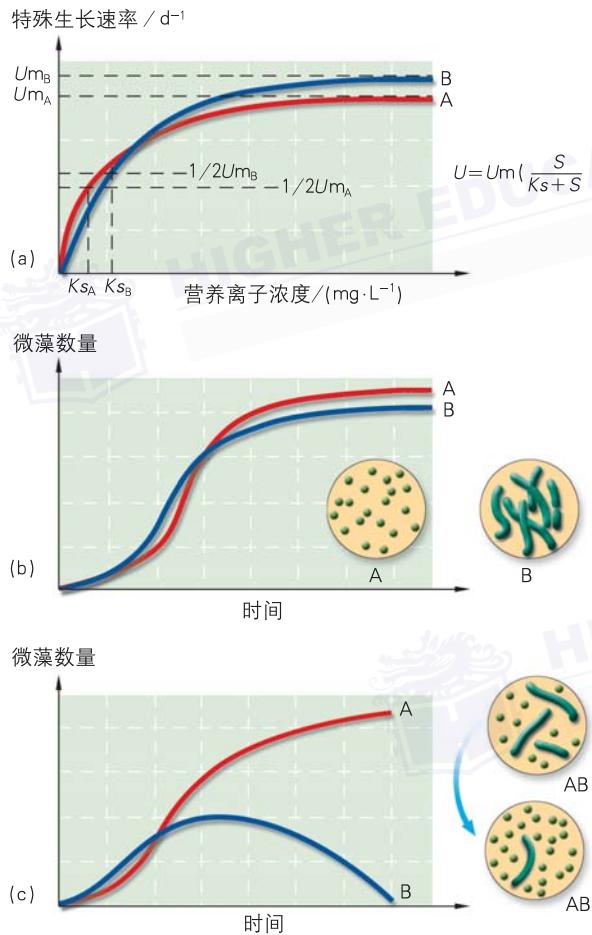


图 10-29 两种微藻利用和竞争营养盐生长结果 (a) 两种微藻 A 和 B 对 HPO_4^{2-} 的吸收是竞争关系, HPO_4^{2-} 营养吸收动力学研究发现, 两种微藻具有不同的营养吸收动力学常数值 (K_s)。(b) 对 A、B 两种微藻分别培养, 它们的生长曲线没有显著区别。(c) 把 A、B 两种藻类混合培养于 HPO_4^{2-} 浓度略低于 K_{sA} , 却大大低于 K_{sB} 的培养液中, 从 (a) 图可以看出, 在这样的 HPO_4^{2-} 浓度条件下, 微藻 A 对 HPO_4^{2-} 的吸收能力大于微藻 B。在一段时间混合培养后, A 的数量不断增多, 但 B 却开始下降。结果说明, 由于 A 对 HPO_4^{2-} 的吸收效率较高, 所以竞争性利用营养盐的结果必将导致 A 逐渐成为优势种群, 而 B 的数量将越来越少, 最终被竞争所淘汰。

捕食也是群落中普遍存在的种群间的一种相互关系。捕食包括动物猎食动物, 被捕食者常常被杀死(图 10-30), 广义的捕食还包括动物吃植物, 大多数情况下植物仍然存活并可继续生长。自然界通过种群间的捕食关系, 调节着一些种群的数量, 捕食者与被捕食者的数量往往存在着相互制约的反馈关系, 也促进了捕食者与被捕食者的协同进化。例如, 一些被捕食动物体表的伪装色(与环境背景相似的颜色)就是抵御捕食者, 提高存活率的一种适应性进化结果。



图 10-30 动物的捕食现象 捕食是群落中最普遍的种群间相互关系之一。大多情况下, 捕食者和它的猎物属于不同物种。一般, 捕食者对食物有特殊的敏感, 并能准确认出和定位它的猎物。它们中的大多数具有一些身体条件上的共性: 利爪、尖牙、螯刺或毒液。同时, 在不断与捕食者的较量和进化中, 被捕食的种群也发展出一系列防御机制和方法, 以更好地保护自己。

寄生是指一种生物生存于另一种生物的体内或体表并从中获利。寄生的结果可以导致被寄居的一方受害并死亡, 也可以受伤害但不至于死亡。寄生于人体的血吸虫、蛔虫和寄生于动植物体内的各种病原菌对于人体的健康和农业、畜牧业等的危害很大。寄生于人体消化道的一些细菌并不对人体造成危害, 相反有促进和帮助消化的作用。

共生是另一类种群间互利的相互关系, 这种互利的关系被固定以后, 如果失去一方, 另一方便不能生存, 例如地衣就是藻类和真菌的共生体。

群落中物种的相互关系和相互作用还包括互惠、共栖、抗生等多种形式。

生态学家非常重视**生态位**(niche)的概念和研究, 所谓生态位是指某种生物在群落和生态系统中的位置和状况, 它决定于该生物的形态适应、生理反应和特有的行为。某种生物的基础生态位包括了它生存和生殖的全部最适生存条件, 而现实生态位则包括限制该生物生命活动的各种作用力(如竞争、捕食和气候等)。在自然界, 当两种生物在同一空间利用同一资源或占有同一环境变量时, 就会出现生态位的重叠。这种重叠可以伴随着竞争, 也可以不竞争。环境资源量的供求比决定了重叠生态位是否为竞争关系。

四、群落的演替和扰动

地球上各处的环境一直处于不断的变化之中，因此群落是一个动态系统。群落的稳定是相对的，变化则是绝对的，虽然这种变化有时显得非常地缓慢。一块废弃的农田任其自然发展，最初田里会长满各种野草，以后以草本植物为优势的群落便会逐渐被各种灌木所替代，再以后田里出现了乔木，这些乔木越来越繁盛，占据了优势的地位，最后形成了一片相对稳定的森林群落。这样一种群落取代另一种群落的过程称为群落的演替或**生态演替** (ecological succession)，演替达到的最终相对稳定状态，就是**顶级群落** (climax)。

从一个没有植被的地表发展到顶级群落需要一定的气候条件。只要气候条件合适，从裸露的岩石最终演变到出现顶级群落通常要经历地衣阶段、苔藓阶段、草本植物阶段、灌木阶段和森林阶段 (图 10-31)。这一自然发生的完整过程称为**初生演替** (primary succession)。

在初生演替中，地衣是唯一能在岩石上首先定居的植物类群。壳状地衣能够忍受严酷的岩石表面生长条件，它们利用岩石表面的微粒和微量水分进行生长，并借助于自身分泌的有机酸等加速岩石向土壤的分化。当薄薄的一层土壤和腐殖质出现后，壳状地衣就会被叶状地衣

和枝状地衣所取代。由于地衣的开拓作用，它们又被称为地表的先锋植物。

通过地衣的逐渐改造作用，岩石进一步风化，腐殖质进一步积累，一层较浅的土壤层形成了。一旦土壤层出现，生长缓慢的地衣便被以孢子进行繁殖的苔藓植物所替代。土壤层进一步加厚，适应于以种子为主要繁殖方式的草本植物的生长。在利用水、土和营养等资源方面，草本植物比苔藓植物更具有竞争力，草本植物大量繁衍和快速地生长逐渐将苔藓植物排除。植被条件的改善为一些动物提供了栖息生存的条件，多年生的草本植物也逐渐出现。到草本植物演替的后期，由于立体向上生长的灌木可更有效地利用太阳光，提高光合作用的效率，于是出现了灌木与草本植物混生的现象，并进一步演替到灌木成为优势群落。它们也为更多的鸟类、爬行类动物提供栖息生活的场所。以后，更高大的树木生长起来后。树冠连成一片，遮住了灌木的光线，森林便成为一个更加稳定的顶级群落 (图 10-31)。

一个湖泊经过一系列的演替也可发展成为顶级群落。这种完整的初生演替可以包括裸底阶段、沉水植物阶段、浮叶根生植物阶段、挺水植物阶段、湿生草本植物阶段、灌木阶段和森林阶段。

由地震、雷击产生大火、火山喷发、大风、洪水暴

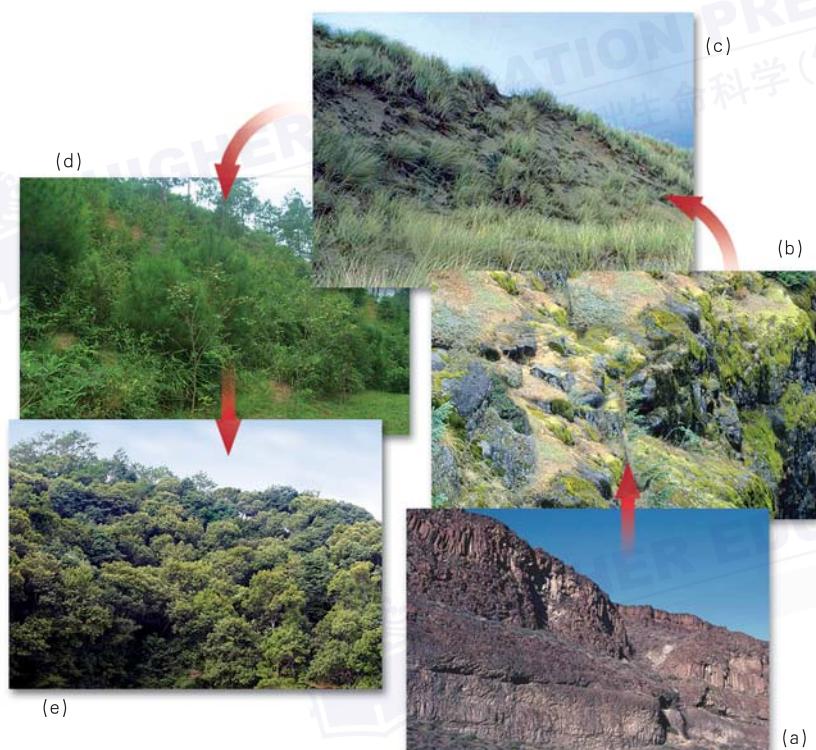


图 10-31 群落初生演替经历的地衣阶段、苔藓阶段、草本植物阶段、灌木阶段和森林阶段

(a) 地衣是地表的先锋植物，壳状地衣能够利用岩石表面的微粒和微量水分生长。它们借助自身分泌的有机酸等加速岩石向土壤风化，逐渐产生出薄薄一层土壤和腐殖质，此时壳状地衣会逐渐被叶状地衣和枝状地衣所取代。(b) 通过地衣长期的改造作用，岩石进一步风化，土壤变厚，出现了较浅的土壤层，同时腐殖质进一步积累。土壤层出现后，生长较慢的地衣被生长、繁殖较快的苔藓植物取代。(c) 随着土壤层进一步加厚，由于草本植物在利用资源方面更有竞争力，而且以种子生殖为主要繁殖方式，生长更快，因而取代了苔藓植物成为优势群落。(d) 草本植物演替后期，灌木由于立体向上生长可以更有效地利用阳光，从而出现了灌木与草本植物混生的现象，灌木逐渐成为优势群落。(e) 高大乔木生长后，森林成为一个稳定的顶级群落。

发、突然的冰期等各种突发灾难对群落造成的伤害，可以导致区域性物种的死亡、群落的稳定和平衡被破坏，正常的群落演替被中断，这些都属于群落的扰动（disturbance）。经群落扰动后，群落可以再次进行演替，这种演替称为**次生演替**（secondary succession）。

在群落的演替和扰动方面，近年来生态学家越来越重视**生物入侵**的问题，所谓生物入侵是指某种生物从原来的分布区域扩展到一个新的（通常也是遥远的）地区，在新的区域里生存和扩散，并对新地区的环境和生物多样性造成严重的影响或威胁。科学家们特别呼吁，要防止人们有意或无意地从一个地区或国家将某种有害的物种带到另一个地区或国家，由此造成环境或经济的损害。

群落的演替与生物的进化是一个协同的过程，其间穿插着生物多样性的变化。因此，了解和研究群落演替的规律对于维持生态系统的稳定和优化具有重要的意义。

第四节 生态系统

一、生态系统的概念

生态系统是生物学组织体系中最高的层次，它包含了一定区域里的全部生物和土壤、水、空气等所有的物

理环境。**生态系统**是生物群落与非生物因子通过能量流动（energy flow）和物质循环相互作用而构成的生态综合体（图10-32）。全球总的生态系统又被定义为**生物圈**。

生态系统的共同特征包括：（1）生态系统内部在一定范围和限度下具有自我调节的能力，这种自我调节的能力与生物多样性程度成正比；（2）生态系统中的能量流动、物质循环和信息传递体现了生态系统的动力学特征，生态系统内部始终处于运动之中，能量的流动是单向的，物质流动是循环式的；（3）生态系统吸收的太阳能量一般都通过4~5个不同营养等级的生物进行传递；（4）从地球上生物起源到现在，生态系统经历了从简单到复杂的发育阶段。

生态系统的组成成分非常复杂，主要包括生物和非生物两大部分。

生态系统的生物部分包括生产者（producer）、消费者（consumer）和分解者（decomposer）3大类功能类群。由藻类、绿色植物、光合细菌和化能细菌组成的**生产者**是生态系统中有机质的制造者，是生态系统最基本的组成部分。由食草动物、食肉动物、杂食动物、腐食生物组成的**消费者**与生产者一起构成了生态系统的食物链或食物网。细菌、真菌等微生物是生态系统有机质的



图10-32 生态系统模型 生态系统是在一定时空内的生物群落与环境共同构成的复合体，其中的能量流动、物质循环和信息传递及相应地自我调节等将生态系统中的各要素有机地组织在一起。生态系统及其调节与平衡是人类赖以生存的基础。

分解者，它们的存在对于生态系统的物质循环是必不可少的。

生态系统的非生物部分，包括如氧、氮、二氧化碳、水、各种无机盐等在内的无机物，如蛋白质、糖类、脂类、核酸和腐殖质等在内的有机化合物，还包括太阳能、气候、各种基质和介质等。生态系统的非生物部分构成了生命的支撑系统（图 10-33）。

二、生态系统的营养结构

生态系统中各类生物之间的营养关系决定了能量流动和物质循环的途径，生态学家根据生物的营养来源确定各种生物处于什么样的营养水平（trophic level）。通过处于不同营养水平的生物之间的食物传递形成了一环套一环的链条式关系结构，称为**食物链**（food chain）。陆地生态系统和海洋生态系统都形成了各自的食物链（图 10-34）。在食物链基部的一些光合自养生物是生态系统的生产者，它们能够利用太阳能合成有机物作为营养来源。在陆地生态系统中，植物是主要的生产者；具光合作用的原生生物（藻类）和光合细菌是水域生态系统的生产者，它们多数是浮游植物（phytoplankton）。在一些浅水环境中，多细胞藻类和一些高等水生植物也是水生生态系统的重要生产者。

所有位于生产者营养水平之上的异养生物都是消费者，它们直接或间接以生产者制造的有机物为食物。那些直接以植物、藻类或光合细菌为食物的食草动物（herbivore）为生态系统的**初级消费者**。许多昆虫、一些爬行动物、部分脊椎动物、草食性哺乳动物和鸟类等属于陆地生态系统中的初级消费者；各种各样以浮游植物为食的浮游动物（zooplankton）和一些草食性鱼类则是水域生态系统的初级消费者。

所有位于初级消费者营养水平之上的生物是肉食性动物，它们以其营养水平之下的动物为食。这些在陆地上的**二级消费者**包括一些小的哺乳动物、啮齿类动物、多种多样的鸟类、两栖类和大型食肉动物。在水生生态系统中的二级消费者则包括一些较小的鱼类，这些小鱼专吃浮游动物和底栖无脊椎动物。更高营养水平的生物称为三级消费者，例如专吃鼠类和其他二级消费者的蛇就属于三级消费者。另外，食蛇的鹰类和海洋中的某些鲸类又属于四级消费者（图 10-34）。

图 10-34 所显示的食物链其实并不完整，因为它没有显示生态系统中另一类非常重要的消费者即分解者。这些称为分解者的消费者主要包括细菌和真菌等微生物，它们通过分解生物死亡后的有机体，从中获得营养和能量。在自然界中，被上一级营养水平的动物吃掉的部分

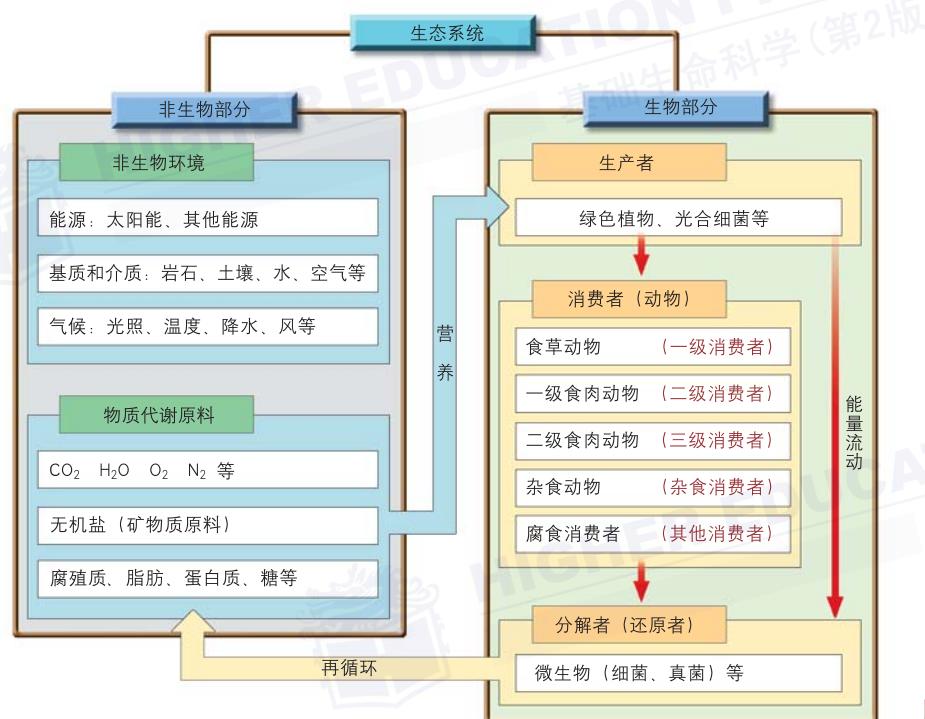


图 10-33 生态系统的组成



图10-34 陆地和海洋生态系统食物链 一般食物链都由生产者、消费者和分解者三部分组成。其中生产者是以简单的无机物制造食物的自养生物，如陆上的植物与水中的浮游植物。消费者是直接或间接依赖于生产者所制造的有机物质的异养生物。消费者按其在食物链上的位置分为(1)食草动物(一级消费者)，如水中的浮游动物和底栖动物、草地上的食草昆虫和哺乳动物；(2)食肉动物(二级消费者)，如水中以浮游动物为食的水生动物及陆地上以食草动物为食的捕食性鸟兽；(3)大型食肉动物或顶级食肉动物(三级消费者)，如池塘中的黑鱼，草地上的鹰等猛禽。对由生产者和消费者产生的有机体或有机质最终都通过分解者(大都是些异养细菌或腐生微生物)将它们转化成土壤中的营养物质。食物链还构成了生态系统中能量单向流动的途径。

占其生物量的比例一般都很小，这些动植物大部分在死后被分解者所利用。土壤、湖底和海洋底部大量的微生物在分解有机体、维持生态系统的物质循环方面的作用是任何其他生物所不能替代的。

在生态系统中，一种生物往往并不只固定在一条食物链上，它们可以同时加入几条食物链。例如一些杂食动物(包括人类)，既可以以动物为食，又可以以植物为食。草食性动物既可以被狮子等二级消费者捕食，又可以直接被三级或四级消费者所捕食。因此，生态系统中的营养关系实际上是一种网状结构，因此称为**食物网**(food web)。图10-35是一种陆地生态系统食物网的简示图。通常情况下，食物网越复杂，生态系统就越稳定；食物网越简单，生态系统就越容易发生波动或遭受毁灭。生态系统中的各种生物成分正是通过食物网发生直接和间接的联系，维持着生态系统的功能和稳定。

三、生态系统中的能量流动

所有生物的一些活动如代谢、生长、运动和繁殖都需要能量。每天太阳输送到地球的能量大约为 10^{19} kJ。

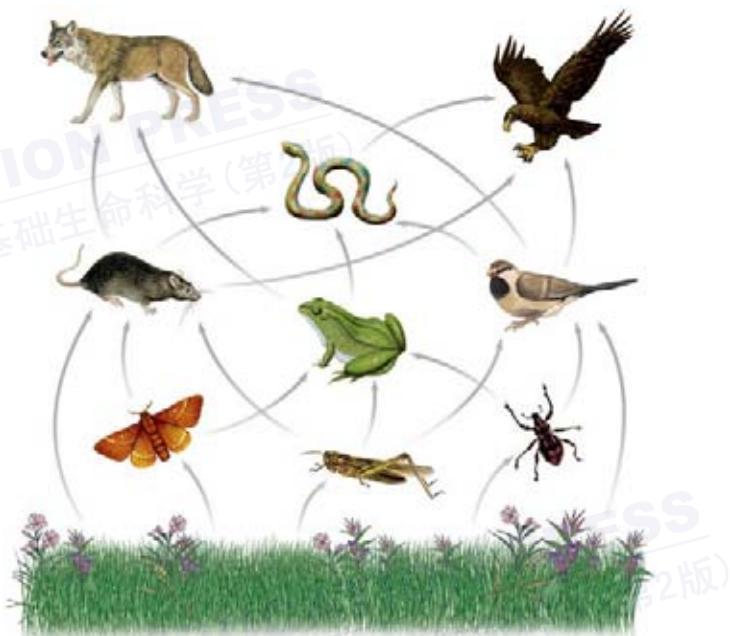


图10-35 陆地生态系统食物网 如图所示的是一个陆地生态系统食物网。一般地说，在具有复杂食物网的生态系统中，一种生物的消失不至于引起整个生态系统的失调，也就是说，复杂的食物网有较强的稳定性。不过，一般在食物网中会有若干种关键物种，它们的数量和生存方式很大地影响着生态系统的整个结构。

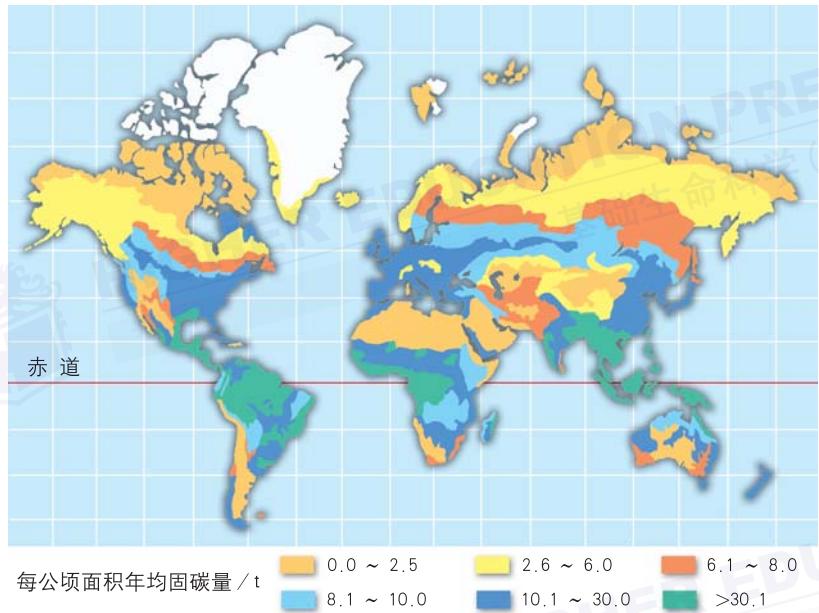


图10-36 全球各处陆地生态系统净初级生产力分布情况 地球上藻类、光合细菌和植物等生产者所制造的有机质被称为生态系统的初级生产力。图中所示的净初级生产力是初级生产力扣除植物自身呼吸消耗掉的以后剩下的那部分。各种主要生态系统单位面积净初级生产力从高到低大致为：热带雨林、温带森林、稀树草原、灌丛、温带草原、大洋、荒漠和冰原。

这些能量的绝大部分都被地球表面的大气层所吸收、散射和反射掉了。大约只有1%的能量以可见光的形式被地球上的植物通过光合作用转化成为化学能。从全球范围看，每年全球光合作用已经足以生产出大约1700亿吨有机质。

生态系统中总的生物有机体物质称为**生物量** (biomass)。地球上藻类、光合细菌和植物等生产者所制造的有机质被称为生态系统的**初级生产力** (primary productivity)。地球上不同地区生态系统的初级生产力不一样，对整个生物圈总生产力的贡献也不一样(图10-36)。生态系统中的初级生产力及生物量作为贮存了化学能的有机“燃料”在食物网被分割和利用，地球上总的初级生产力是一定的，因此，生态系统中的能量分配和利用也是有限度的。

按照热力学第一定律，能量可以由一种形式转化为另一种形式，在转化过程中能量既不能消灭，也不能凭空产生。热力学第一定律也是能量守恒定律，生态系统中的能量流动和转化也是严格遵守着热力学第一定律。输入生态系统中的能量(太阳能)总是和生物有机体贮存、转换的能量和释放的热量相等。被生态系统通过初级生产力所固定的太阳能很大一部分被各营养水平的生物所利用，通过呼吸作用以热的形式散失到空间，这些以热的形式散失的能量不能再回到生态系统参与流动和被利用，因此生态系统中的能量流动是单一方向的(图10-37)。

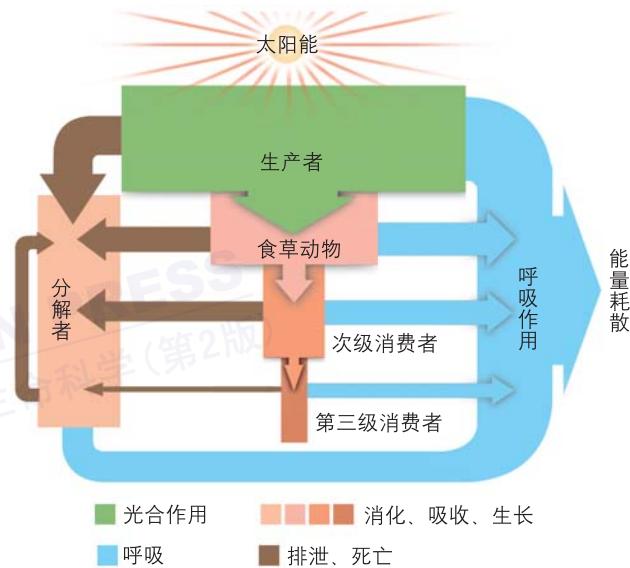


图10-37 生态系统中的能量流动是单一方向的 图中的生产者为绿色植物(包括藻类)，消费者有食草动物(包括浮游动物)和肉食动物，分解者主要是一些微生物。生产者通过光合作用吸收太阳能，能量以食物的形式在不同营养水平的生物间传递。图中箭头方向为能量流动方向。如图所示，输入生态系统的能量(太阳能)总是通过单一的方向经过食物链，最终等量地以呼吸作用热形式散失到空间中。其中“等量”体现了热力学第一定律即能量转化与守恒定律，而“单一方向”体现了热力学第二定律的要求。简单地说，为了保持生态系统维持熵稳定的平衡状态(熵是体系的一种状态函数，它表征了体系的一种热力学混乱程度，在孤立体系中，熵会自发朝着增大的方向发展)，必须把高效能量(光能)转化为低效能量(热能)作为代价。



图 10-38 能量沿食物链流动 在生态系统中,当能量以食物的形式在不同营养水平间传递时,大部分能量是以热能形式散失的,包括排泄和呼吸作用,而只有少部分转化为新的有机质贮藏于体内。如图所示,食物链中每两级之间的能量转换效率大约只有 15% 或更少一些。实际上,这种比率也是由热力学第二定律所限制的。

在生态系统中,当能量以食物(有机“燃料”)的形式在不同营养水平的生物间传递时,食物中相当一部分能量通过呼吸作用以热的形式散失,其余被用于合成新的有机质作为潜能贮存下来。例如,在由树叶、毛虫和食虫鸟 3 个环节组成的食物链中,毛虫吃叶片,食虫鸟再吃毛虫。能量沿着食物链在流动时(图 10-38),大约只有 15% 叶片的生物量(能量)被转化成毛虫的生物量,叶片其余的生物量及能量通过毛虫的细胞呼吸和毛虫排泄物被微生物分解,最终以热的形式散失。同样,毛虫被食虫鸟摄食后,也仅有大约 10% 的能量被转化贮存在食虫鸟体内。能量在生态系统中各级营养水平生物之间传递

的效率很低,能量在各营养水平的生物间每传递一次,便损失掉很多(约 90%),因此,初级生产力不可能维持太多的消费者,生态系统吸收的太阳能量一般最多只能通过 4~5 个不同营养级的生物进行传递。由于通过食物链后能量的逐级损失,食物链中的能量也呈现下宽上窄的金字塔型,称为**能量金字塔**(energy pyramid)(图 10-39)。相应地,营养等级越高,归属于这个营养水平的生物种类和数量就越少,如此便形成了食物链由下向上的金字塔构造,被称为**生物量金字塔**(biomass pyramid)。在自然界,海洋浮游藻类、光合细菌和陆生植物位于金字塔的基部,因此生物量最大,位于金字塔上部的各种



图 10-39 生物量金字塔和能量金字塔 由于能量在生态系统各营养级中传递效率很低,所以初级生产力大多只能传递 4 级或 5 级。而且,随着营养水平的增高,食物链中的能量水平就不断降低,显示出从下向上由宽到窄的金字塔型,称为**能量金字塔**,如图所示。实际上,类似的还有**生物量金字塔**,其中每一层标志此营养级所有生物的干重,它通常也是呈下宽上窄的金字塔型的。

异养动物的生物量越来越少。

从能量的角度考虑,生态系统是一个开放系统,不断的能量输入和能量的散失,使该开放系统维持一种稳定的平衡状态。

四、与生命活动相关联的物质循环

生态系统不断地依靠太阳为其提供能量,所有物质在生态系统中不断地被循环利用,随着营养水平等级的提高,能量沿食物链传递时逐级损失和减少,生物量也随之发生变化。在一个生态系统中,诸如碳、氮、磷之类的物质不断地改变形态,有时它们是生物体的一部分,有时是非生物体系的成分。例如,你手指甲里的碳原子可能曾经属于一个苹果,再之前,它可能来源于海洋中的一个 HCO_3^- 离子。碳、氮、磷和水等许多与生命活动相关联的物质以多种形式——生物的或非生物的形式,原子的、分子的或生物大分子的形式等在自然界中循环,这些物质的循环叫做**生物地球化学循环**(biogeochemical cycle),因为它们既涉入了生物化学系统,又涉入了地球化学系统(图10-40)。

生态系统中所有物质的生物地球化学循环都有一

些共同的特点:①碳、氮、磷和水等许多生命活动所必需的物质都有一个非生物库(abiotic reservoir)。例如,在大气中碳原子以 CO_2 气体的形式贮存于大气中,植物通过光合作用将无机碳同化为有机食物时,就是从这样的“库”中获取碳源。以后通过生态系统生物体的细胞呼吸和微生物的分解作用,存在于各种生物大分子中的碳又会再成为 CO_2 ,回到这个非生物库中,以后可再次循环。②有一些物质虽然与生命活动密切相关,它们其中的一部分也可以完全通过地学过程进行循环,例如水与生命活动具有密切的关系,除了可以进入生物系统外,水还可以通过湖泊与海洋的蒸发和降雨过程在非生命体系的地学过程中进行循环。③有些化学物质需要经过微生物的加工才能被生物所利用,进入生物地球化学循环。例如对于氮元素来说,自然界最大的“氮库”是大气中的 N_2 ,但生物本身不能直接利用大气中的 N_2 ,有些微生物如固氮细菌能够将大气中的 N_2 固定转变成氨(NH_3)或硝酸态(NO_3^-)的氮,然后才可被植物所吸收和利用以合成生物体的成分。④在生物地球化学循环中,大量土壤中的微生物作为分解者可以将有机体和有机大分子分解成为简单的无机小分子,这些无机小分子可再被生物系统循环使用,微生物对各级营养水平生物有机质的分解作用是生物地球化学循环的关键环节。

图10-40只是概括了一般物质生物地球化学循环的粗略过程,生态系统中不同的物质其循环的途径各不相同,以下我们分别来考察水、碳、氮和磷这4种与生命活动关系最密切物质的生物地球化学循环的概况。

1. 水的循环

生态系统中,所有的生命都与水息息相关。植物光合作用直接以水为原料,生物体的许多代谢反应都以水为介质,生物体内的水解反应需要水的直接参与,水携带着无机物和有机物在生物体内运输,借助于水排出有机废物使生物系统得以更新,生活在水域生态环境中的群落更是离不开水,否则水生群落很快便会解体。

水的循环涉及非生物过程和生物过程(图10-41)。水循环中最大的“水库”是海洋,太阳光使大量的水从海洋、湖泊、河流及地表蒸发,蒸发到大气中的水汽83%来自海洋,水汽冷却成为降雨,仅有75%的雨水降落在海面上,水汽从海洋移向陆地,陆地的降雨量大于其水的蒸发量。陆地上水除了被生物利用以外,多余的水通

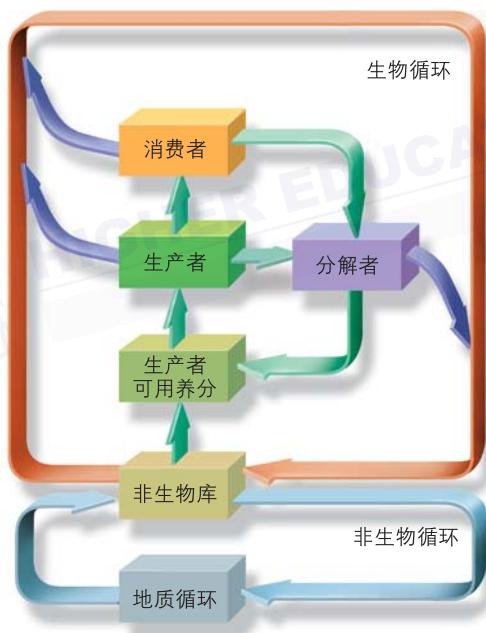


图10-40 生物地球化学循环示意图 生态系统中的物质循环与能量流动是两个基本过程,能量流动是单向的,而物质却是循环式的流动。生物圈的物质融入了整个大自然的物质循环中,所以称为生物地球化学循环。图中表示出了生物地球化学循环的主要流动方式和过程。

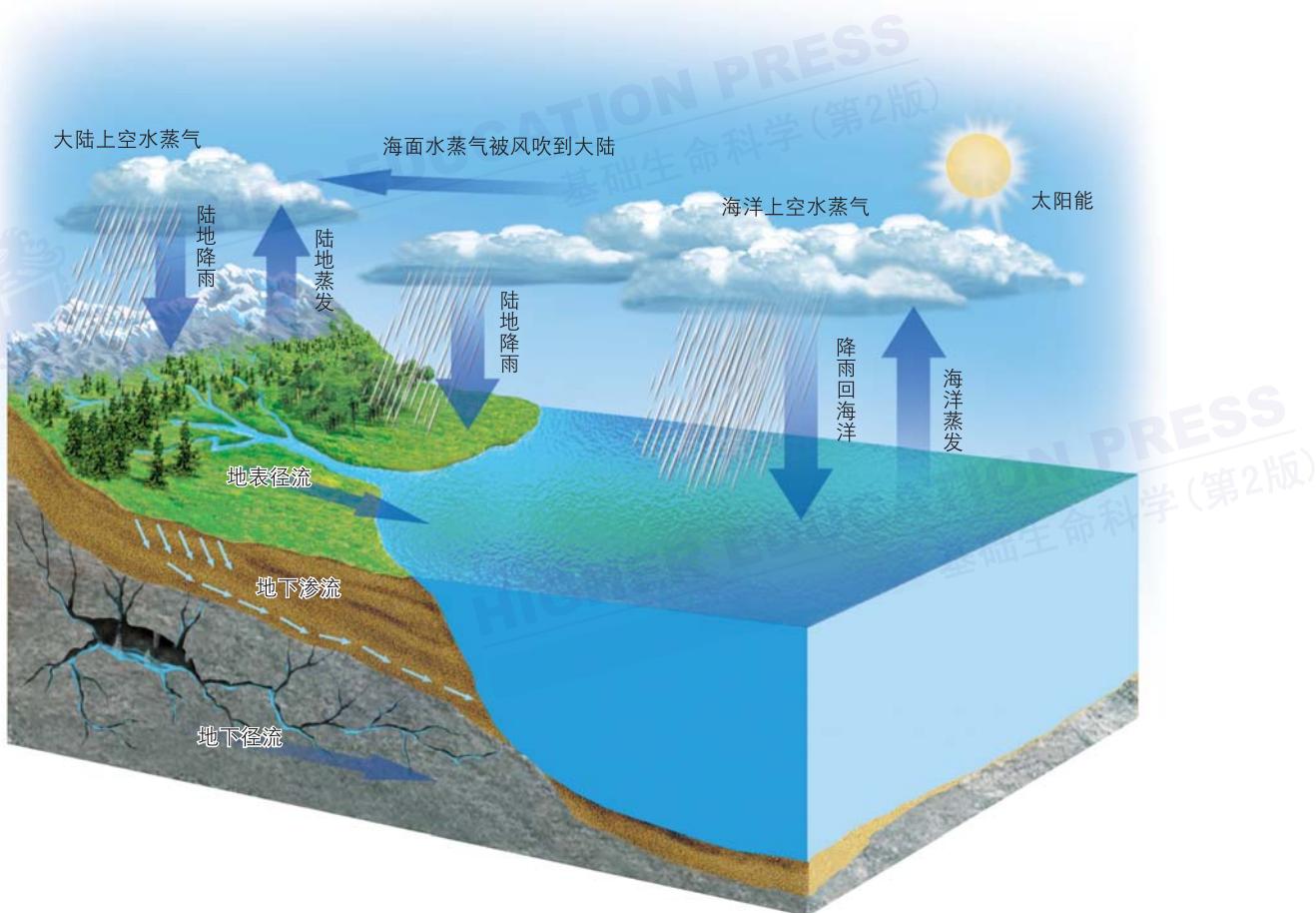


图 10-41 自然界水的循环 水循环的过程通过降水、地表径流、入渗、地下径流、蒸发、植物蒸腾等环节，把大气圈、水圈、岩石圈和生物圈联系起来，并在其间进行能量交换。

过河流回归大海。绝大部分的植物通过土壤吸取水分，通过叶片上的气孔将很大一部分吸取的水分蒸腾出去。夏季白天里，一棵枫树平均每小时蒸腾排出的水量可达 200 多升。动物通过饮水、吃植物和其他动物来补充水分，通过排泄和体表蒸发，排出水分。从陆地上看，凡是水的循环越活跃的地方，生命的活动就越活跃，热带雨林就是一个很好的例证。

2. 碳循环

碳循环在生态系统物质循环中具有特殊重要的作用，因为碳是所有有机分子的骨架，是最基本的生命元素。地球上碳的分布非常广泛，最活跃地参与生物地球化学循环的碳的形式是存在于大气中的 CO_2 和存在于海洋中的 HCO_3^- ，其总量分别达到 $6.4 \times 10^{12} \text{ t}$ 和 $3 \times 10^{14} \text{ t}$ 。沉积在海洋和湖泊底部的碳酸盐逐渐形成沉积岩，其所贮存的不活跃的碳达到 $1.8 \times 10^{18} \text{ t}$ 。

每年海洋中的浮游植物（包括藻类和光合细菌）和陆生植物通过光合作用将大量的无机碳转化为有机碳，这些有机碳在全球范围的食物网中流动（图 10-42），全球生物体以有机碳形式保持的碳含量可达 $3 \times 10^{13} \text{ t}$ 。光合作用不断地将无机碳转变为有机碳，生物细胞的呼吸作用又将有机碳分解成为 CO_2 。值得提出的是，海洋生态系统初级生产力相当大，对全球 CO_2 循环的作用举足轻重。有些海洋浮游植物不但可以通过光合作用固定无机碳，还能够将无机碳沉积在细胞表面（如颗粒藻），因此具有两种 CO_2 的固定途径。浮游植物、陆生植物、食草动物、食肉动物和微生物的呼吸作用都是 CO_2 产生的源泉。

动植物死亡后除了一部分被微生物氧化分解外，另一部分沉积在海洋和湖泊底部的生物体如果被快速埋藏，在缺氧的还原条件下经过地质演化作用可以转变成为石

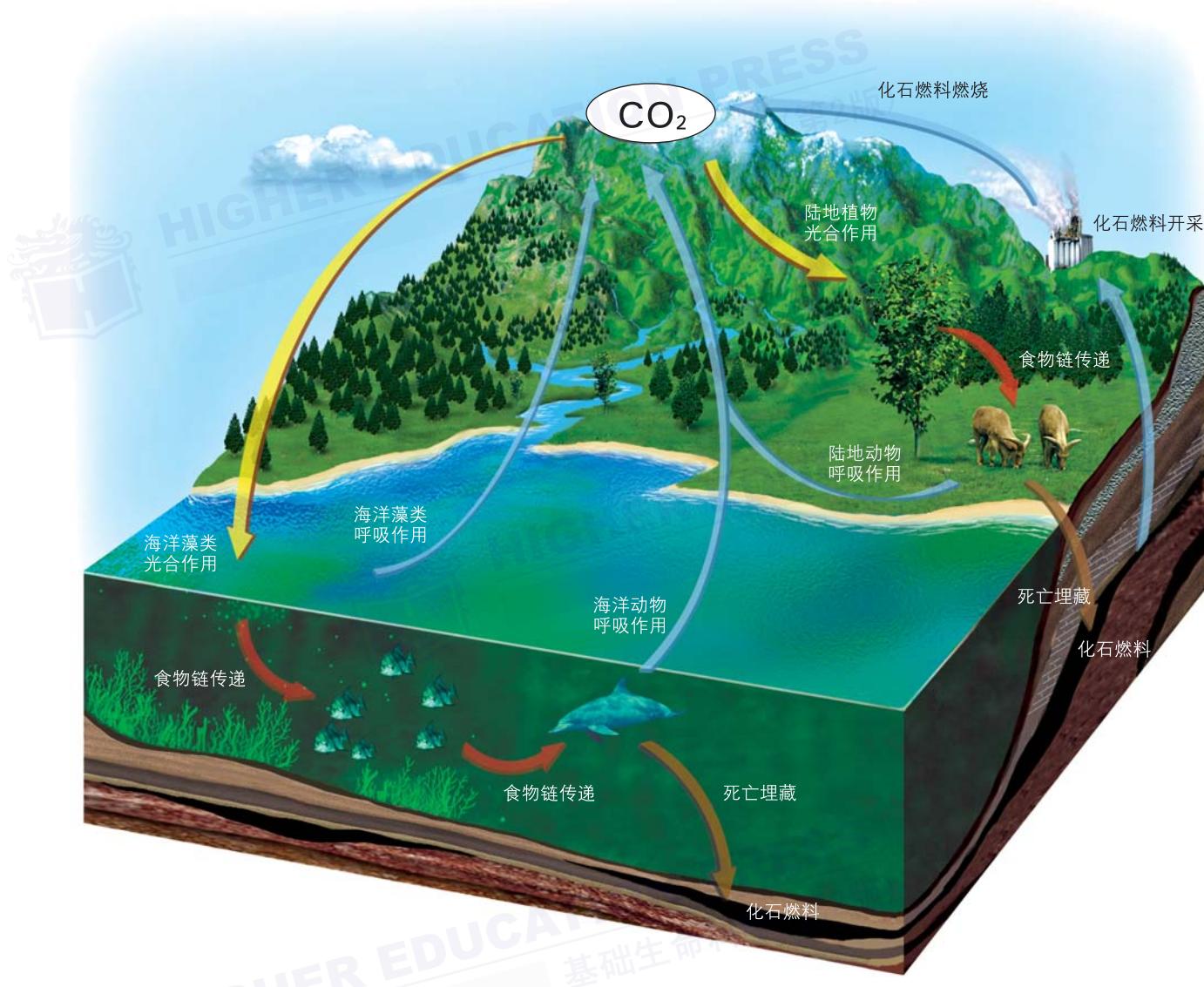


图10-42 碳循环 碳在无机环境中以二氧化碳或碳酸盐的形式存在，其在无机环境与生物群落之间是以二氧化碳的形式进行循环的：二氧化碳通过生产者的光合作用合成为有机物，一些海洋浮游植物还能将无机碳沉积在细胞表面固碳。生物群落中的碳又通过生物的呼吸作用和微生物的分解作用以二氧化碳的形式返回到大气中。还有一部分生物死亡后快速被埋藏，经过复杂的地质演化转变为煤、石油、天然气等化石燃料贮存在地层中。

油、天然气和煤炭等化石燃料。人类对这些化石燃料的开发利用，又将它们转变成CO₂释放到大气中。这些化石燃料的过度开发利用，极大地增加了大气中的CO₂含量，引发了地球的“温室效应”，对全球的生态平衡造成了巨大的伤害。

3. 氮循环

氮是蛋白质和核酸不可缺少的组成成分，对生物体的组成、代谢和遗传具有特殊重要的作用。N₂在大气中的含量最高，我们呼吸的空气中78%为N₂。可惜这些N₂

不能直接被绝大多数的生命系统所利用。氮是不活泼元素，以三个共价键结合形成的N₂化学结构非常稳定，打破这些化学键需要输入很大的能量，这是它们难以被直接应用的重要原因。许多植物只能以NH₄⁺或NO₃⁻为氮源，这些氨态氮(NH₄⁺)和硝态氮(NO₃⁻)在植物体中被转变成含氮有机物。自然界中有些微生物如固氮细菌能够将大气中的N₂固定转变成氨态或硝酸态的氮，经过这样的处理和加工，便可直接被植物所吸收和利用来合成生物体的成分。但总体来说，自然界可以被生物直接

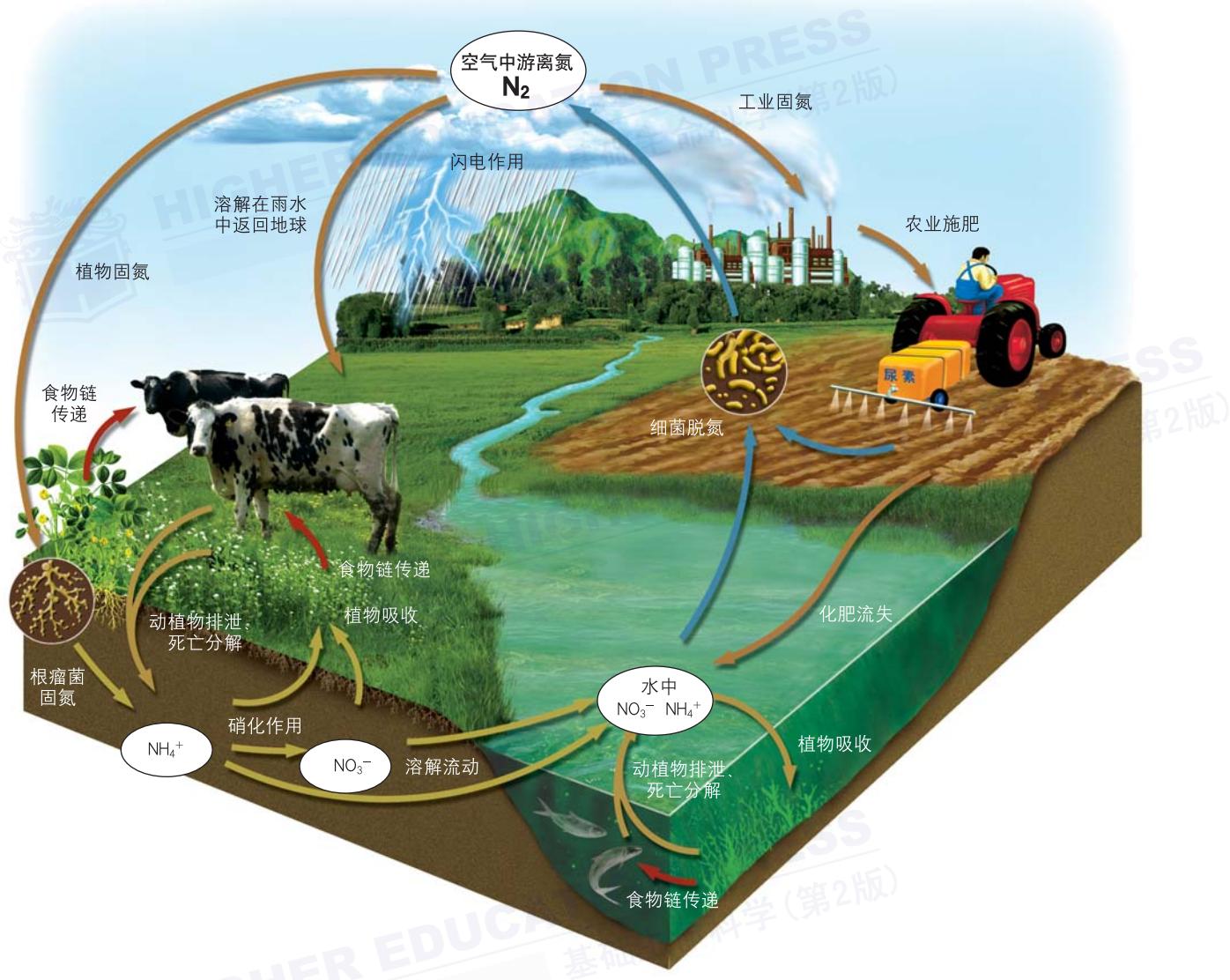


图 10-43 氮循环 氮是蛋白质和核酸必不可少的组成成分, 对生物体的组成、代谢和遗传有着重要意义。自然界中的游离态氮只有通过固氮菌等生物的固氮作用、闪电中的固氮作用或人工手段转化为氨态氮或硝酸态氮后才能被大部分植物所利用, 进入生物圈。由于自然界可以被生物利用的氮十分短缺, 人类在农业中不得不消耗大量能量用于合成氮肥。生物体死亡后被微生物分解, 从而使得氮元素回到无机环境中。

利用并达到一定浓度的氮仍然是短缺的, 因此人们不得不在化肥厂消耗大量的能量来合成氮肥以弥补农业中可利用氮的短缺。异养的消费者(动物)和分解者(微生物)都是通过从其他动植物的组织来获得它们所需要的氮。各类生物通过体内的呼吸与氧化作用来分解蛋白质等, 使之转变成氨、尿素或尿酸再排出体外。这些又可以再次被植物所吸收利用(图 10-43)。

那些可利用的氨态和硝酸态氮在生物地球化学循环中很容易被稀释, 如NH₃在大气中挥发, 溶于水中的硝

酸盐被大雨从土壤中带入河流进入湖泊和海洋。有一些细菌也能将硝酸盐转变成N₂。另一方面, 自然界的闪电具有将N₂转变成NH₃的作用, 雨水再把这些NH₃带到地面, 或多或少地弥补了可利用氮的损失。

4. 磷循环

在DNA、RNA、ATP和其他高能有机分子中, 磷是不可缺少的成分, 构成细胞膜的磷脂也需要磷的参与。与碳和氮相比, 生命只需要很少量的磷, 但这种物质可利用的形式却非常少, 植物一般只利用H₂PO₄⁻形式的

磷。植物的含磷量大约只占植物体的3%，这些少量的磷却要从更低含量（一般仅占土壤的 $3 \times 10^{-6}\%$ ）的土壤中获得。

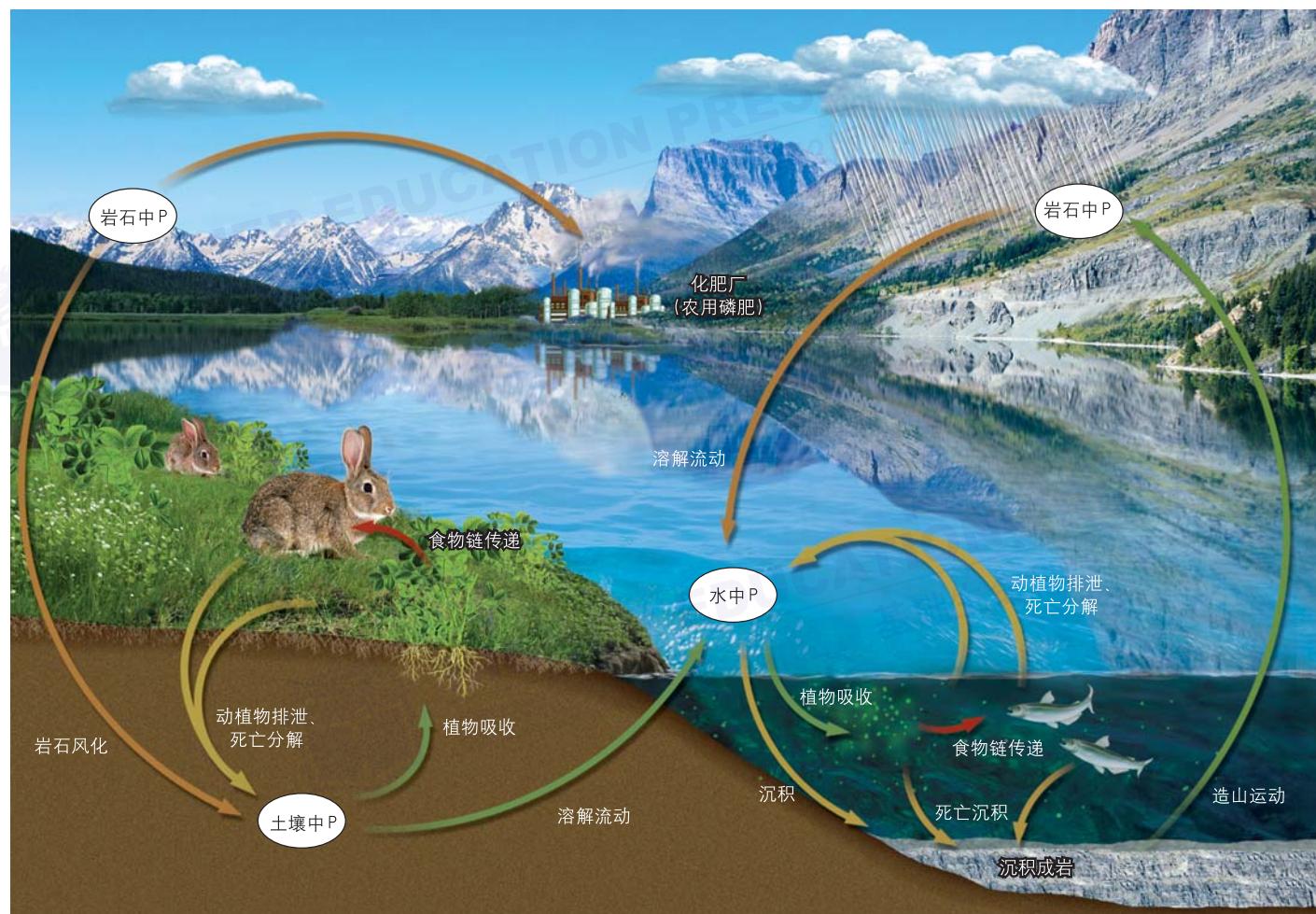
在陆地生态系统中，含磷有机化合物被细菌分解成为磷酸盐，进入土壤后重新再被植物所利用，另一些被微生物等分解者直接利用，成为微生物的一部分，还有一些被分解成的磷酸盐随水流进入湖泊或海洋，以钙盐的形式长期沉积下来。陆地的异养动物主要依靠摄食植物和其他动物获得其所需要的磷（图10-44）。在水生生态系统中，浮游植物吸收无机磷的效率很高，浮游动物和其他水生动物靠所摄食的浮游植物获取磷。一些磷从陆地生态系统被雨水冲入海洋沉积后，很难回到陆地生态系统再被循环使用。只有沉积为矿物的磷酸盐露出水面，经过风化作用才可能再被植物吸收而循环利用。海

洋动物被捕食也能使一部分磷返回陆地。海鸟的粪便含有大量的磷，磷虾、甲壳类等海洋生物在磷的循环中也起了重要的作用。

生态系统对磷特别敏感，轻微增加土壤或水环境中磷的浓度可能刺激生物快速地增长。例如人类的活动使排入湖泊的含磷肥料和含磷洗涤剂增加，过量的磷造成浮游藻类大量繁殖成水华，使湖泊水体受到严重的有机污染。

还有许多元素和物质与生命活动密切相关，它们的生物地球化学循环不在此一一介绍。另外，人类活动对物质循环的影响越来越大，下一节将涉及这方面的问题。

图10-44 磷的循环 生物对磷的需求量较小，磷可被生物利用的形式也很少，一般只有磷酸二氢盐可以被植物利用。生态系统对磷十分敏感，环境中磷浓度的增加可能会刺激生物快速生长，例如浮游植物对无机磷的利用效率很高，近年来人类活动使得排入水体的含磷肥料和洗涤剂增加，造成浮游藻类的大量繁殖形成赤潮（海洋生态系统）和水华（湖泊生态系统），使水体受到严重有机污染。磷在自然界中的循环是典型的沉淀型循环。这种循环主要有两种存在相：岩石相和溶解盐相。岩石相主要指含磷岩石，它们通过风化变为可溶性磷酸盐，后者可直接被生物所利用。在经过食物链传递后，又以磷酸盐形式回到土壤中。然而，如图所示，这些可溶性磷酸盐中有不少被江河带入海洋，并沉积在海底。只有通过造山运动或海洋动物，这些磷才得以回到地面。



第五节 生物多样性、人口、资源与可持续发展

生物多样性、人口、资源和环境是全球生态系统中相互制约、相互作用的最基本因素，探讨它们之间相互作用规律并分析对人类未来的影响，不但对于人类本身明智地选择可持续发展战略具有重要的价值，而且对于维持整个生态系统的平衡，维护生物多样性等方面具有积极的意义。

一、生物多样性及其意义

生物多样性反映了地球上包括植物、动物、微生物等在内的一切生命都有各不相同的特征及生存环境，它们相互间存在着错综复杂的关系。生物多样性，一个简单的词语，描述了一个真实和精彩的大自然。它制造氧气，让我们能够自由呼吸；它提供食品，让我们的生命得以延续；它提供能源（煤炭和石油都来源于古代的生物）和各种资源，让我们的生活有了物质保障。

生物多样性包括以下3方面的内容：

(1) 物种多样性 地球上的生命是多种多样、丰富多彩的：从非常小的一个病毒到重达150 t的鲸；从行动缓慢的蜗牛到每小时能奔跑90 km的猎豹；植物借助于风、水和动物的迁移把自己的后代送向远方；仅节肢动物门下的昆虫就有100多万种之多，大自然中每一样物种都是独特的，从而构成物种多样性(图10-45)。物种多样性是用一定空间范围物种数量的分布频率来衡量的，这个范围通常还可以包括整个地球的空间范围。

(2) 遗传多样性 世界上所有生命既能保持自己物种的繁衍，又能使每一个个体都表现出差别，这要归功于其体内遗传密码的作用和基因表达的差别。遗传的多样性指同一个物种内基因型的多样性，是衡量一个种内变异性的概念。在组成生命的细胞中，DNA是遗传物质，由4种碱基在DNA长链上不同的排列组合，决定了基因及遗传的多样性。在人类DNA长链上就有约3万个基因，它记录了我们祖先的密码(图10-46)。大自然用了几十亿年的时间，建造起如此浩繁、精致和复杂的基因库，任何一个物种的绝灭，都会带走它独特的基因，令我们永远地遗憾。

(3) 生态系统多样性 地球表面，到处都是生机勃



图10-45 显示物种多样性的代表 生物物种的多样性是地球的宝贵财富，世界上到底有多少物种，还没有人能做出精确的估计。例如，目前已有记录的昆虫为75万多种，有人估计地球上昆虫总数应超过100多万种。图中显示的形形色色的飞蛾属于昆虫类动物，由此可见物种多样性一斑。

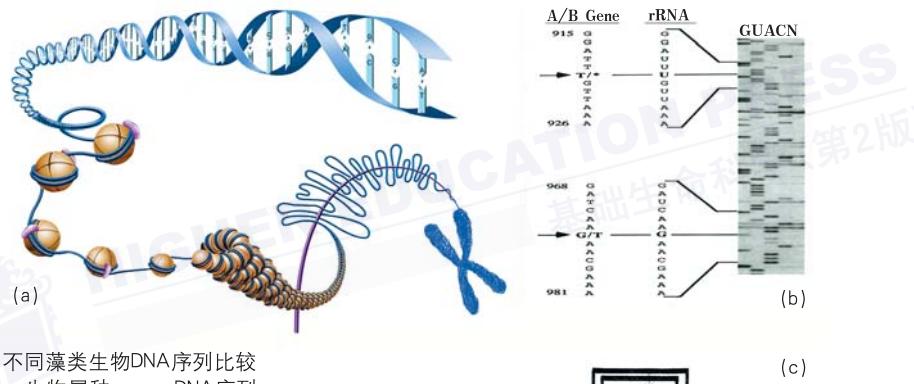
勃的生命。为适应在不同环境下生存，各种生物与环境又构成了不同的生态系统，这就是生命的家园。在不同的生态系统中，各种生命通过极其复杂的食物网来获取和传递能量，同时完成物质的循环。生态系统的结构、功能、平衡及调节机制千差万别是生物多样性的重要内容。

维护地球生命的过程是由多样性的生命来完成的。生物多样性是地球上生物经过几十亿年发展进化的结果，它们的未知潜力为人类的生存和持续发展显示了不可估量的美好前景。

历史的发展可能会越来越多地显示这一天的重要性，1992年6月，包括中国领导人在内的150多个国家的首脑云集巴西里约热内卢联合国环境与发展大会，签署了全球的《生物多样性公约》。同年11月，中国七届人大28次会议审议批准了该公约，中国成为率先加入《生物多样性公约》的国家之一。该公约1993年12月正式生效。中国积极参与国际社会的生物多样性保护行动，中国政府又相继签署了《湿地公约》、《濒危野生动植物国际贸易公约》、《联合国防治荒漠化公约》等国际公约。

由于人口的急剧增长，人类对生物资源不合理的利用使自然环境遭到严重破坏，生物多样性正在以前所未有的速度被破坏。

人类无节制侵占并毁坏了大量原本属于野生动植物的家园，大量向自然界排放有毒废水、废气和废渣。据估计目前全球每分钟损失耕地40公顷，损失森林21公



不同藻类生物DNA序列比较
生物属种 DNA序列

<i>Eudorina elegans</i>		CTTCAGCGG C AGCGGG CGNNATTC CCATTG CGG AC GG TGTTG AGCTTAATG ACATCCCG G SCCTGGG TGTGTTT GGAATGAGA C AACCTAA
<i>Volvic aureus</i>		CTCCA CAT CGAGGAAG C AGCGGG CGNNATTC CCATTG CGG AC GG TGTTG AGCTTAATG ACATCCCG S .. TTCCGGG TGTGTTT GGAATGAGA C AACCTAA
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>		CTCCA CAT CGAGGAAG C AGCGGG CGNNATTC CCATTG CGG AC GG TGTTG AGCTTAATG ACATCCCG S .. TTCCGGG TGTGTTT GGAATGAGA C AACCTAA
<i>Chlamydomonas eugametus</i>		CTCCA CAT CGAGGAAG C AGCGGG CGNNATTC CCATTG CGG AC GG TGTTG AGCTTAATG ACATCCCG S .. TTCCGGG TGTGTTT GGAATGAGA C AACCTAA
<i>Stephanosphaera moewusii</i>		CTCCA CAT CGAGGAAG C AGCGGG CGNNATTC CCATTG CGG AC .. AGG GA GTTGTTG AGCTTAATG ACATCCCG S .. TTCCGGG TGTGTTT GGAATGAGA C AACCTAA
<i>Haematococcus lacustris</i>		CTCCA CAT CGAGGAAG C AGCGGG CGNNATTC CCATTG CGG AC .. AGG GA GTTGTTG AGCTTAATG ACATCCCG S .. TTCCGGG TGTGTTT GGAATGAGA C AACCTAA
<i>Chlpir</i>	 GGG CGNNATTC CCATTG .. CGG NS .. SS .. GG GA GTTGTTG AGCTTAATG ACATCCCG S .. TTCCGGG TGTGTTT GGAATGAGA C AACCTAA
<i>Uronema belkae</i>		CTCCA CAT CGAGGAAG C AGCGGG CGNNATTC CCATTG .. CGG NS .. SS .. GG GA GTTGTTG AGCTTAATG ACATCCCG S .. TTCCGGG TGTGTTT GGAATGAGA C AACCTAA
<i>Draparnaldia plumosa</i>		CTCCA CAT CGAGGAAG C AGCGGG CGNNATTC CCATTG .. CGG NS .. SS .. GG GA GTTGTTG AGCTTAATG ACATCCCG S .. TTCCGGG TGTGTTT GGAATGAGA C AACCTAA
<i>Ulothrix zonata</i>		CTCCA CAT CGAGGAAG C AGCGGG CGNNATTC CCATTG .. CGG NS .. SS .. GG GA GTTGTTG AGCTTAATG ACATCCCG S .. TTCCGGG TGTGTTT GGAATGAGA C AACCTAA
<i>Ulva fasciata</i>		CTCCA CAT CGAGGAAG C AGCGGG CGNNATTC CCATTG .. CGG NS .. SS .. GG GA GTTGTTG AGCTTAATG ACATCCCG S .. TTCCGGG TGTGTTT GGAATGAGA C AACCTAA
<i>Enteromorpha intestinalis</i>		CTCCA CAT CGAGGAAG C AGCGGG CGNNATTC CCATTG .. CGG NS .. SS .. GG GA GTTGTTG AGCTTAATG ACATCCCG S .. TTCCGGG TGTGTTT GGAATGAGA C AACCTAA
<i>Chlamydomonas nectigama</i>		CTCCA CAT CGAGGAAG C AGCGGG CGNNATTC CCATTG .. CGG NS .. SS .. GG GA GTTGTTG AGCTTAATG ACATCCCG S .. TTCCGGG TGTGTTT GGAATGAGA C AACCTAA
<i>Chlamydomonas moewusii</i>		CTCCA CAT CGAGGAAG C AGCGGG CGNNATTC CCATTG .. CGG NS .. SS .. GG GA GTTGTTG AGCTTAATG ACATCCCG S .. TTCCGGG TGTGTTT GGAATGAGA C AACCTAA
<i>Haematococcus zimbabwiensis</i>		CTCCA CAT CGAGGAAG C AGCGGG CGNNATTC CCATTG .. CGG NS .. SS .. GG GA GTTGTTG AGCTTAATG ACATCCCG S .. TTCCGGG TGTGTTT GGAATGAGA C AACCTAA
<i>Oocystis minuta</i>		CTCCA CAT CGAGGAAG C AGCGGG CGNNATTC CCATTG .. CGG NS .. SS .. GG GA GTTGTTG AGCTTAATG ACATCCCG S .. TTCCGGG TGTGTTT GGAATGAGA C AACCTAA
<i>Carteria crucifera</i>		CTCCA CAT CGAGGAAG C AGCGGG CGNNATTC CCATTG .. CGG NS .. SS .. GG GA GTTGTTG AGCTTAATG ACATCCCG S .. TTCCGGG TGTGTTT GGAATGAGA C AACCTAA
<i>Carteria lunzensis</i>		CTCCA CAT CGAGGAAG C AGCGGG CGNNATTC CCATTG .. CGG NS .. SS .. GG GA GTTGTTG AGCTTAATG ACATCCCG S .. TTCCGGG TGTGTTT GGAATGAGA C AACCTAA
<i>Carteria oliveri</i>		CTCCA CAT CGAGGAAG C AGCGGG CGNNATTC CCATTG .. CGG NS .. SS .. GG GA GTTGTTG AGCTTAATG ACATCCCG S .. TTCCGGG TGTGTTT GGAATGAGA C AACCTAA
<i>Carteria radiosa</i>		CTCCA CAT CGAGGAAG C AGCGGG CGNNATTC CCATTG .. CGG NS .. SS .. GG GA GTTGTTG AGCTTAATG ACATCCCG S .. TTCCGGG TGTGTTT GGAATGAGA C AACCTAA
<i>Carteria sp.UTEX LB 762</i>		CTCCA CAT CGAGGAAG C AGCGGG CGNNATTC CCATTG .. CGG NS .. SS .. GG GA GTTGTTG AGCTTAATG ACATCCCG S .. TTCCGGG TGTGTTT GGAATGAGA C AACCTAA
<i>Chlpir</i>		CTCCA CAT CGAGGAAG C AGCGGG CGNNATTC CCATTG .. CGG NS .. SS .. GG GA GTTGTTG AGCTTAATG ACATCCCG S .. TTCCGGG TGTGTTT GGAATGAGA C AACCTAA
<i>Chlamydomonas cultus</i>		CTCCA CAT CGAGGAAG C AGCGGG CGNNATTC CCATTG .. CGG NS .. SS .. GG GA GTTGTTG AGCTTAATG ACATCCCG S .. TTCCGGG TGTGTTT GGAATGAGA C AACCTAA
<i>Scenedesmus obliquus</i>		CTCCA CAT CGAGGAAG C AGCGGG CGCAAUUUC CCACUC .. CGG AU .. AGG GA GUUGGG AGCTTAATG ACATCCCG S .. TTCCGGG TGTGTTT GGAATGAGA C AACCTAA

顷，11公顷良田被沙漠化，向江河湖海排放污水85万吨；另有300个婴儿出生；有28人死于环境污染。近400年里，已记录到有484万种动物灭绝，而实际上物种灭绝的速度远远超过了记录到的数字；随着世界人口的爆炸，经济的发展，物种灭绝的速度还要加快。专家预计：从1990年到2015年，世界上将有60万到240万种生物灭绝！在美国举行的1999年国际植物学大会上，动物学家和植物学家指出，人类活动破坏了地球将近一半的陆地，正导致自然界的动植物加速走向灭绝，如果这种情况持续下去，估计21世纪后半叶，将有1/3至2/3的物种从地球上消失。

科学家从对古化石的研究中发现，地球在过去曾经历“五大绝种潮”，其中一次发生在6500万年前，庞大的恐龙(dinosaur)就是当中的受害者。人类现正处于第六次绝种潮边缘。鸟类化石专家把地球上数次出现的绝种潮分成5次，每次时段从100万年至1000万年不等。最大规模的一次绝种潮发生在大约2亿5000万年前，有77%~96%的物种被淘汰。而且，从种种迹象看来，动植物绝种的速度将会加快。国际保护自然联盟1996年发表的濒危物种“红色警报名单”显示，世界现存的大约4500种哺乳动物中，面临绝种的已占24%，而现存的约9500种鸟类中，有20%即将灭绝。在已知的大约100000种木本植物中，

濒临绝种的物种约占6%，其中有1000种左右危在旦夕。

一个基因可能关系到一种生物的兴衰，一个物种可能影响一个国家的经济命脉，一个生态系统可能改变一个地区的面貌。在人类还没有来得及开发利用时众多物种便如此大量和快速地灭绝了，从此，我们不知道，而且将来永远也不可能知道这些已经灭绝物种的宝贵价值。例如某种灭绝的生物可能提供特效抗癌药物或治疗艾滋病(AIDS)的特效成分等等。设想一下，假如水稻、小麦、棉花、大豆等物种在人类利用它们之前便灭绝了，如今的人类将是何等的悲哀。更可悲的是，人类可能还不知道其悲哀，因为人类可能正以其他价值较低的物种或以更高的代价来生产食物而沾沾自喜。

全球生物多样性正在迅速丧失，这不仅意味着我们正失去大量以后可利用的资源；更重要的是，那将最终导致我们人类自己，也像其他生物一样，从这个星球上消失！从这个意义上说，保护生物多样性就是保护人类自己(图10-47)！

二、人口增长与生态环境的人口承载容量

地球上各物种之间保持好相应恰当的数量比例是保持好生物多样性的重要条件。人作为地球村生命的成员，

图10-46 4种碱基在DNA长链上不同的排列组合决定了基因及生命的多样性 (a)由DNA双螺旋长链组成染色体的示意图。(b)DNA序列测定的电泳分析图。(c)几种不同生物部分同源片段DNA序列比较。



图 10-47 保护生物多样性就是保护人类自己 人类与其他生物的关系就好像是：下雨了，人用一把小伞为它们遮雨，而它们却用大伞保护着人类。人类只有保护好生物多样性，才能走向光明的未来。这一幅卡通漫画并非夸张，它说明，保护生物多样性，就是保护人类自己。

其增长和总量就必须要限制在一定的范围内。1999年，世界人口突破了60亿大关。现在全世界的人口增长率为1.7%，如果人口的增长继续按照现在的速率进行下去，到2050年，地球人口将达到100多亿（图10-48a）。

中国是全世界人口最多的国家。从1800年到2000年间，中国人口增长总体上是按指数增长模型进行的，中国人口的增长曲线（图10-48b）与世界人口增长曲线非常相似（图10-17）。1762年清朝乾隆年间，中国人口为2亿，占当时世界人口的26.6%。1950年，中国人口占全世界人口的24.12%。近30多年来，由于中国政府实施了成功的人口政策，到1999年世界人口总量突破60亿大关时，中国人口占全世界人口总量的比例已经下降到20.83%，自1950年以来的50年间，平均每年下降0.07%。如此发展下去，人口的指数增长形式将逐渐转

变成为逻辑斯蒂增长模型（图10-14），按照中国人口战略的第一个目标，到2030年，将争取实现人口数量的“零增长”，那时，中国人口占世界总人口的比例将从1999年的20.83%下降到18.82%。尽管如此，到2030年，中国人口还是会达到15亿左右。

自然界的生态规律适用于地球上的一切生物种群，对于人类这一特殊的种群也不例外。在人口数量增长的同时，其外部和内部抑制人口快速增长的作用力也越来越大，阻碍人口按指数形式增长。从外部来看，随着人口的快速增加，可使用的资源越来越少，人类的生存空间越来越小，环境中的诸多生态因素产生了积累式、渐进式的恶化，最终对人类的生存形成严重的威胁。由这些威胁所引发的饥荒、疾病和瘟疫、争夺资源的战争等等都将阻碍人口数量的增加。从内部分析，人类为了维持高水平的生活，自觉认识

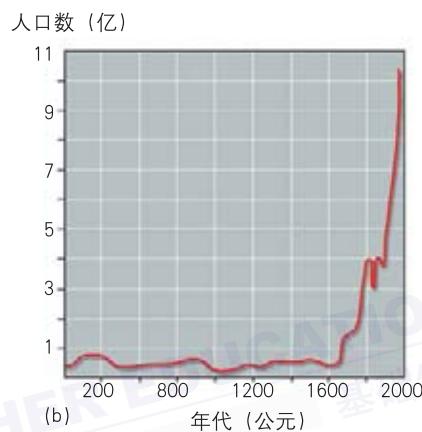
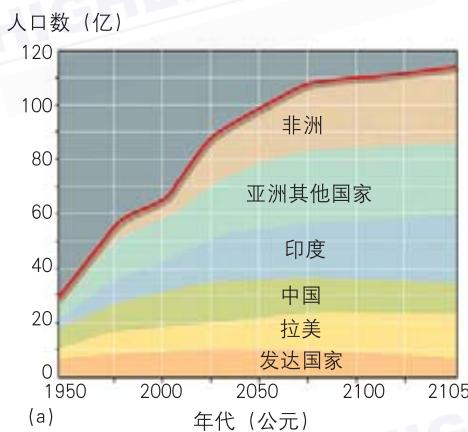


图 10-48 世界和中国人口增长的统计 (a) 世界总人口的发展。(b) 公元200—2000年中国人口变化。可预测的世界人口未来百年的发展中，发达国家的人口基本呈零增长甚至负增长，人口增长较快的主要是一些经济不发达国家。对于这些经济不发达国家，尤其是一些农业不发达，长期粮食短缺的国家来说，如何养活不断增长的人口将是一个严峻的问题。由于中国近年来所采取的积极的人口政策，中国的人口将会在2030年之后进入零增长阶段，中国的努力为解决世界人口危机做出了巨大贡献。

到需要进行自律和自控，自觉认识到维持生态平衡的重要性，从外部和内部抑制人口快速增长会导致人口增长从指数增长形式向逻辑斯蒂增长模型的转换。

究竟地球能够承载多少人口，根据什么来估算地球生态环境的人口承载容量呢？目前可以被接受的依据是净初级生产力（net primary productivity, NPP），即根据全球光合作用产物供给人类活动的比率来衡量地球生态环境的人口承载容量。全球绿色植物（包括藻类和光合细菌）通过光合作用所固定的太阳能减去这些绿色植物本身所消耗的太阳能（如呼吸作用、产热等），其差值就是NPP，它实际上是支持包括人类在内的一切异养生物生存的生物化学能量。有些科学家估计，全球陆地表面每年的NPP中，有40%为人类活动所利用，其余60%被其他动物和微生物所消耗或者被埋藏封闭起来。不同学者根据不同统计资料推断，地球陆地表面可以供养80亿到150亿人口，也有人认为地球还可以供养更多的人口。但所有的学者都承认，地球上的自然资源对于人口的供养是有限的，人口数量不加以自觉限制，人类将无法维持生存安全和文明延续，人类最终将受到自然规律和生态规律的惩罚。

三、资源压力及生态环境面临的严重问题

由于人口与其他生物种群不成比例的超速增长已经使人类这一特殊的种群在生态系统中达到了一种超级水平，形成了对地球资源的巨大压力，对整个地球环境和生态系统演化趋势产生了最根本的影响。

土地资源压力 土地资源应包括耕地面积、土地生产力、粮食供应和食品安全等方面。地球表面陆地的面积仅为30%，陆地上的山地、沙漠、冻土等非可耕地又占绝大部分。联合国粮农组织的有关报告显示，全球用于粮食生产的耕地在1981年为7.32亿hm²，是历史最高记录，到1996年只有6.96亿hm²。从1950年到1996年，全球人口由25亿增加到58亿，而人均粮食作物面积则减少了一半。耕地面积的减少仅是问题的一个方面，土地生产力的下降更加剧了问题的严重性。由气候和人类活动在内的种种因素造成的干旱、半干旱和土地退化导致了土地荒漠化，由于人为因素（包括砍伐森林、破坏植被、粗放垦殖等）导致了水土流失，由于乱垦滥灌、滥用化肥和农药造成土壤盐碱化以及人类垃圾污染等造成土壤变质等等都降低了土地生产力。



图 10-49 饥饿的非洲儿童 人口的过度增长造成了可耕地面积减少和土地生产力降低，这些因素使得全球粮食供应大大不足。2000年，地球上人有5 000多万人受着饥荒的威胁，4.86亿人不能达到最低营养水平，7亿多人营养不良。如果人口的发展势头再不加控制，可以想象又有多少孩子像图中的非洲儿童那样生活于食不果腹的悲惨世界。

人口增加、可耕地面积减少和土地生产力降低的结果必然是粮食供应不足。如今全球有5 000多万人正在遭受饥荒，7亿人因长期贫困而营养不良，发展中国家每年有1 400~1 500万名5岁以下的儿童死于贫困、营养不良和饥饿相关的疾病（图10-49）。

在20世纪60年代兴起的绿色革命，是发展中国家仿效发达国家增加粮食生产的尝试，其核心措施是通过密植推广能比以前增产10倍的水稻和小麦品种。但是绿色革命的“神奇作物”严重地依赖于以化石能源为基础的化肥和灌溉，日益增长的粮食“部分是由石油做成的”。尽管绿色革命在一些地区提高了粮食产量，但整个世界总产量增长却很少，而且它减少了农作物的多样性。例如，一些原有的可以在一些地区良好生长而不需用大量灌溉和施化肥的小麦品种已经丢失。

水资源压力 水是生命之源，是农业和工业生产的基本条件。虽然地球表面70%是水，但其中98%是咸水，在2%的淡水中，又有88%被冻结在南极和北极的冰雪中，因此可被人类直接利用的水量是相当少的。全世界人均每天需要消费水量8 000 L，其中生活用水约占10%，农业用水约占65%，工业用水约占25%。由于人口急剧增加，而淡水资源量不变，水资源危机会越来越严重。由于管理不善导致水资源的浪费和工业废水、生活废水和农业废水的大量排放使水质恶化，更加剧了水资源的短缺。中国属于贫水国家，全国年平均降水量648 mm，低

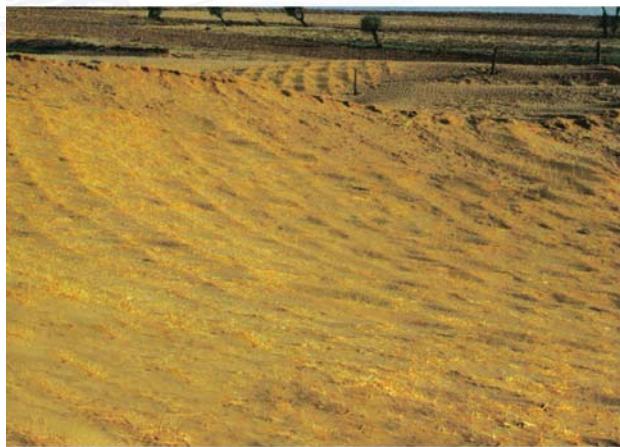
于全球平均值(834 mm), 尤其是中国西北部地区大范围严重缺水, 严重制约了这些地区的经济和社会的发展(图 10-50)。

能源危机 人类活动所需要的能源大多数来自化石能源——煤、石油和天然气。这些化石燃料的能量来自至少6500万年前(石炭纪以前)的古生物固定的太阳能。虽然专家对于化石能源还能持续多久的问题有分歧, 但每个人都意识到能量供应总是有限的, 所有化石燃料消耗完的那一天迟早会来到。

现代农业的生产不仅依靠阳光, 而且依靠化肥, 这些化肥是用化石燃料生产的。一个“石油农业”的产量是自然生态下的10倍。在我们身体内消费的能量之外, 我们还消耗100~1000倍的能量用于工业、交通、取暖、照明和其他活动, 即一个城市居民消耗的能量是他所需食物能量的100~1000倍。这部分能量用来建造房屋、公路、大坝、桥梁、机场以及保证经济运转的大多数商品和服务。能源消耗越多, 经济越发达; 经济越发达,



河床干涸



颗粒无收

图 10-50 干旱导致颗粒无收

人们所消费的能源就更多。在过去的50年里, 世界能源消耗增加了近10倍, 这些能源消耗中, 近一半是石油。专家估计, 到21世纪中叶, 全球的石油危机将达到极限。

森林资源减少 森林是地球的肺, 森林有调节气候、涵养水分、保持水土、防风固沙、防治污染、净化空气、改善环境和保护物种等多方面的功能。自从地球上出现了人类这一特殊的种群, 全球的森林面积已经由原来的76亿hm²减少到1995年的26亿hm², 减少了2/3。目前森林的消失还在加速, 按照目前的毁林速度计算, 亚洲森林在36年后将完全消失, 世界最大的南美洲亚马逊森林9%已遭到砍伐, 现在平均每5秒钟就有相当于一个足球场大小的一块森林在消失。与森林资源减少同步, 全世界的草原沙化、退化也十分严重。森林是生态系统的主体, 森林消失势必造成水土流失、气候异常、空气浑浊、草场沙化、沙尘暴和旱涝灾害频发。如果情况得不到有效地改善, 人类将面临毁灭的灾难。“当人类砍伐地球上第一棵树的时候, 人类的文明便开始了, 当人类砍伐完地球上最后一片森林的时候, 人类的文明便宣告结束。”

环境污染加剧 人口过度增长的后果之一是生态环境的污染, 其中大气污染和水质污染表现得最为突出。大气污染物现有180多种, 可吸入颗粒物(粉尘)、二氧化碳、二氧化硫、一氧化碳、一氧化氮、二氧化氮等排放量大, 对人类生存环境危害最严重。目前, 全世界每年排入大气层的污染物高达10亿t, 其中大部分为工业废气、汽车尾气和其他人类活动所产生的废气。由于空气污染, 污染严重地区的人们呼吸困难, 多种疾病频发, 原本湛蓝的天空变成灰蒙蒙的一片。

化石燃料大多数是碳氢化合物, 燃烧后的主要产物是水和二氧化碳。用煤炭和石油来获取能量便直接增加了大气层的CO₂含量。工业革命前全球空气中平均的CO₂浓度为 2.7×10^{-4} , 到1983年, CO₂的平均浓度是 3.75×10^{-4} , 比1850年上升了35%。科学家预测, 到2050年, 全球CO₂的平均浓度将达到 6×10^{-4} 。大气中CO₂浓度上升的一个直接后果就是大气层变暖, 即形成**温室效应**(green house effect)。一般种植绿色植物的温室能让阳光进来, 使其转化为热量, 热量被温室保留在内部而使温室变暖。大气中CO₂捕捉热量的方法与温室类似, 大气中的二氧化碳能够阻止地面向空间辐射热量, 导致大气

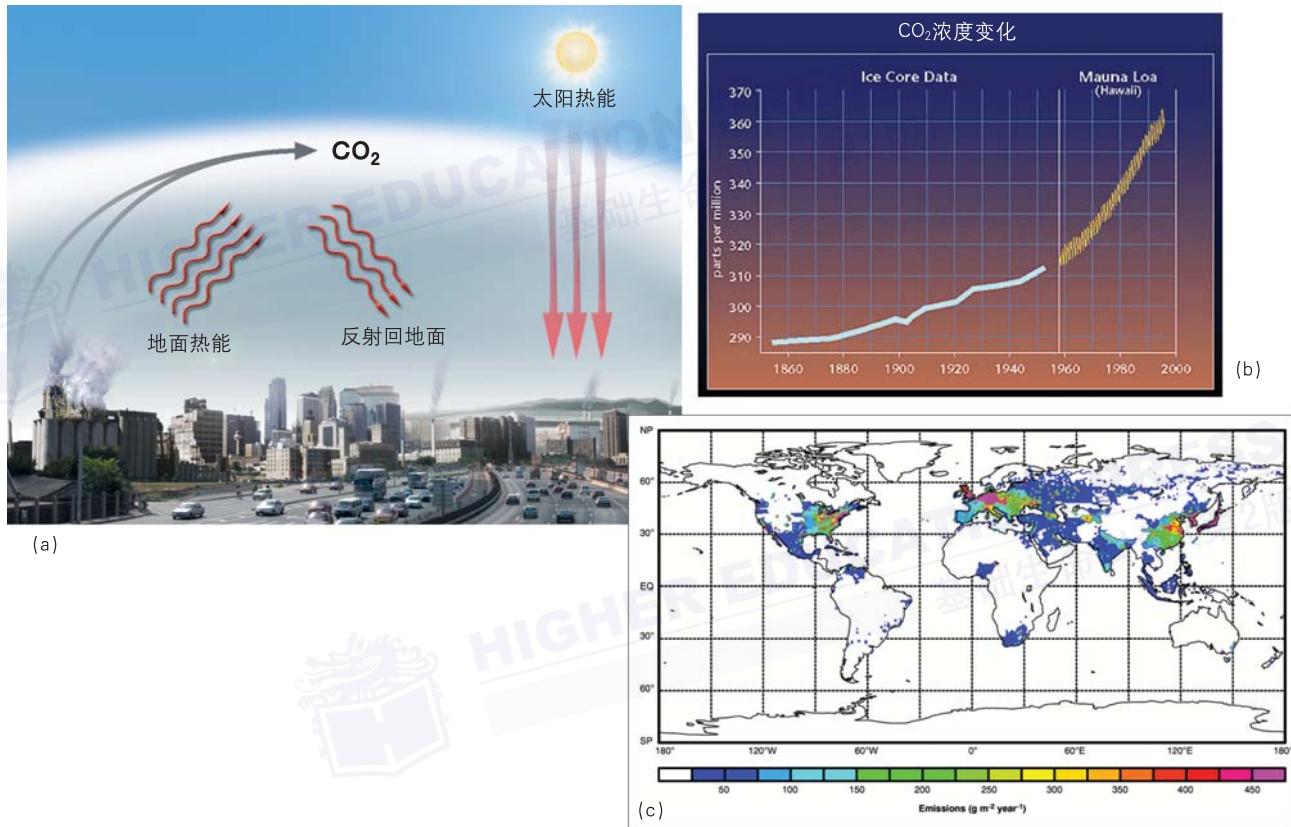


图 10-51 CO₂浓度上升导致温室效应 (a) 温室效应是由于以二氧化碳为主的温室气体能阻止地面向空间辐射热量，并将其保存在地球中而造成的。然而，工业化造成了大量燃烧化石燃料，带来了额外的二氧化碳排入大气，温室效应将给地球带来极大的危害。譬如海平面的上升会淹没大量沿海城市和港口，而暖冬将不利于消灭害虫，使粮食和作物产量大幅度下降。(b) 100多年来部分区域二氧化碳浓度监测记录。(c) 1976年至1999年期间全球气温变化监测结果，红点显示气温上升，蓝点代表气温下降，圆点越大表示气温变化的幅度越大。 CO_2 释放量最高的是经济最发达的北温带地区，因此该地区气温上升幅度最大（据IPCC组织2001年度报告）。

层增温，形成了温室效应（图 10-51 a）。1990 年化石燃料释放出的 CO_2 全球年平均值为 $12.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ，释放量最高的是经济最发达的北温带地区，因此该地区也是全球气温上升幅度最大的地区（图 10-51 b, c）。科学家预料在未来 75 年，日益增加的 CO_2 会引起地球表面温度升高 $3\sim4^\circ\text{C}$ 。这样的增加很可能融化极地冰盖而使海平面上升，淹没沿海城市并改变地球气候。没有人明确知道温室效应会产生什么影响，不过大多数人推算，全球变暖将使粮食产量大大减少。

除了 CO_2 ，最有害的化石燃料燃烧产物是硫和氮的化合物。随着汽车数量的增加， NO_2 以更快的速度注入大气层。大气中 SO_2 大多来自煤的燃烧和金属的冶炼。 NO_2 和 SO_2 可在空气流中飘游千里直到溶解到雨水中，由此造成的酸雨会破坏远离污染源地区的生态系统。另外，阳光的能量能使 NO_2 进一步反应成为光化学烟雾，在

短时间内，这种光化学烟雾会压抑人的肺和心脏。

在近几年工业产生的化学气体中的氯氟烃等被公认为是引起北冰洋臭氧 (O_3) 层空洞的罪魁祸首。氯氟烃由碳氢化合物衍生而成，氢原子被氟和氯代替。最典型的这类物质是氟利昂，被广泛用作冰箱和空调等的冷却剂。一些氯氟烃被用于清洁电路板的溶剂，另一些用于密封住房或喷洒器的密封剂。臭氧是高活性的三氧原子分子，臭氧层离地面 $20\sim50 \text{ km}$ ，阻挡了大部分的紫外线，保护生物圈避免紫外线辐射的威胁。在臭氧层变薄的地方，紫外线到达地球表面，增加了DNA变异的可能性，还可损伤蛋白质分子，并且增加了大气层中的反应活性分子。对人类最明显的影响是增加了皮肤癌的发病率。

尽管海洋生态系统也在遭受严重的污染，赤潮频繁出现便是明显的例证，但与之相比，淡水的污染问题表现得更为普遍和严重。大量的工业废水、农业污水和生

活废水未经处理直接排入小溪、江河、池塘、湖泊，造成江河湖泊的富营养化和水生藻类的大爆发，这些藻类水华遮光耗氧，最终杀死所有水体中的生物。一些化肥、杀虫剂流入江河湖泊对公众健康危害极大，许多化学物质对食物链的影响正在增强。例如DDT可以聚集在生物组织内，特别是聚集在动物的脂肪中。食草动物体内有毒物质的集中程度是那些生活在地下水或湖泊中生物的很多倍，处于营养最高级的食肉动物体内有毒物质集中程度最高。例如，一些湖区鱥鱼体内的汞和农药的浓度是水中的 $1000\sim 1400$ 万倍。当这些物质进入人体后将增加人类患癌症和其他疾病的可能性，并对大脑结构产生长期的影响（图10-52）。

四、生态平衡和人类社会可持续发展战略

生态系统中的能量流动、物质循环与信息交流总是不断地进行着，在一定时间内，生态系统内的生物种类与数量相对稳定，它们之间及它们与环境之间的能量流动、物质循环与信息交流也保持稳定，达到统一协调的状态，这种平衡状态就叫生态平衡。生态平衡是动态的和相对的平衡，其主要特征包括：（1）生物的种类和数量保持相对稳定；（2）物质与能量的输入和输出保持相

对的稳定；（3）物质与能量的循环与流动保持合理的比例与速度；（4）生态系统具有良好的自我调节能力。

特别需要指出的是，人类需要的生态平衡是对人类的生存与发展有利的平衡。例如，自然的生态平衡初级生产力很低，不能维持人口增长的需要，因此人类建立了更高效的农业生态系统来满足对食物和纤维的需要。这种经人工改造的农业生态系统是不稳定的，它的平衡需要靠人类来维持。

经人工改造的农业生态系统极不稳定。一片农场经常被用来种植一种作物或牧养一种牲口，或至多几种物种。农业的机械化和灌溉的发展使大多数农场热衷于单一耕作，只种植一种作物。单一性使农场主能够协调从耕种到收割的各个步骤。在一些国家，整个经济可能依靠于少数几种作物和动物。因此，经人工改造的生态系统的复杂性和生物多样性大大低于自然生态系统。人为选择高产物种导致了遗传的单一性，从而使现代农业作物和畜牧业对病虫害的侵犯特别敏感。在一个自然生态系统里，病虫害必须把它所侵害的生物从许多物种中分别找出来。但在人工生态系统中，病虫害可以很容易找到并聚集在一小片地域上，接着在大量单一的动植物种群中迅速传播，造成严重的危害。最近大规模发生在欧

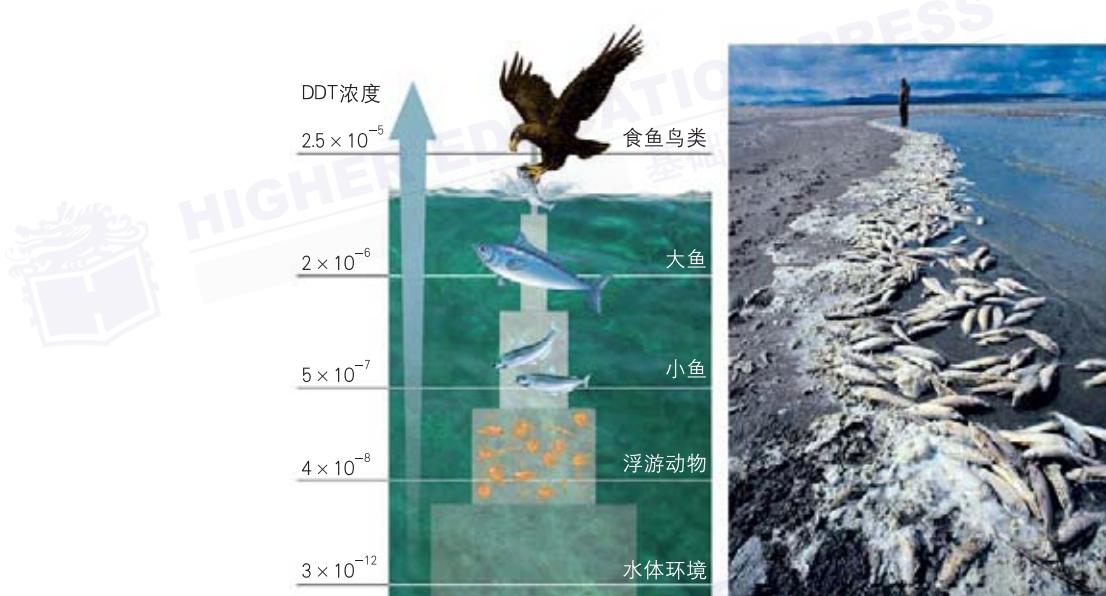


图 10-52 DDT 污染水源后在食物链中的放大 在水污染中，很重要的一部分是由于化学物质如杀虫剂、化肥排入水中后通过食物链进入人体内。图中DDT的食物链放大就是典型的例子。这种放大的主要原因是由DDT的难分解性和在体内的聚集性。前者使它不能被土壤所降解，被雨水带入江河；后者是它一旦进入生物体内就很难排出，沿食物链不断放大也就很自然了。DDT能大大增加人类患癌症的几率，目前已有很多国家禁用。

洲等地的口蹄疫和疯牛病，导致一些国家畜牧业遭到灭顶之灾，就是这样的例证。

为了维持人工生态系统的高产，大量的化肥、农药和农业机械的制造和使用，形成了大规模的工业和人口的城市化，又引起地球资源和能源的过度开发利用，加剧了环境污染。由此我们可以看出，控制人类这一特殊种群的数量即控制人口的过度增长，阻止人工改造的生态系统过度扩张，保持一定比例的自然生态系统和维持全球整个生态系统的平衡对人类是最有利的。

近年来，科学家们十分重视多学科交叉的全球变化研究，所谓全球变化是指在一定的自然或人为因素驱动下，通过一系列系统过程的变异，使地球系统状态和功能发生整体或部分改变，从而表现出具有时空变化特征的全球环境特征，影响着整个地球的可持续性。近几十年的全球变化的趋势是地球环境和人类生存环境的恶化，主要表现为温室气体浓度升高、全球暖化加剧、森林和湿地面积剧减、大气和水域污染加剧、生物多样性下降等。因此，全球变化既是人类社会面临的挑战，又是实现可持续发展的基础。

基于对全球变化的认识，为了人类的自身利益和维持全球生态系统的平衡，20世纪80年代初，联合国世界环境与发展委员会提出了可持续发展的理论和战略。可持续发展策略强调的是生态环境与经济的协调发展，追求人与自然的和谐，既要使人类的各种需求得到满足，又要保护生态环境，不对后代人的生存和发展构成危害。其核心思想是建立在生态平衡和持续基础上健康的经济发展，鼓励对环境有利和对环境友好的经济活动，不单纯片面用国民生产总值（GNP）作为衡量发展的唯一指标，而是用包括生态环境和维护生物多样性的多项指标

来衡量发展。可持续发展总体策略的内容包括人口、生产和环境保护3方面多项政策和行动计划（图10-53）。

可持续发展作为人类萌生的理想和行为规范在未来高度的物质文明、精神文明中将成为现实。人类文明各阶段已有的生态直觉、生态伦理思想、环境意识将建立起人类的生态文明，在人类科学技术生态化水平上达到人与自然关系的真正和谐。只有到那时，维护了生物多样性的人类才能说：以代谢、遗传和进化为特征的生命是永恒的。



图10-53 可持续发展总体策略的内容 1983年11月，联合国世界环境与发展委员会（WEDC）提出了“可持续发展”的理论和战略。一夜之间，这个名词便传遍了全世界。这个策略纠正了以往人们对自然的错误思想，强调生态环境与经济发展相协调，追求人与自然的和谐，既能使人类满足物质需求，又保护生态环境。可持续发展战略，标志着人类自然观的历史性转变。人和自然的关系从此由朦胧阶段、对立阶段、掠夺阶段走向和谐阶段。人类文明的发展道路必须是与整个自然和谐协调的可持续发展之路。



思考与讨论

1. 为什么要学习生态学？请举例说明环境对于生命的重要性。
2. 在种群个体数量增加的指数增长模型方程和逻辑斯蒂增长模型方程中，增长系数 r 值的本质含义是什么？
3. 为什么说生态系统越复杂，其稳定性就越好？
4. 请列举科学家在个体、种群、群落和生态系统 4 个不同层次水平上开展生态学研究的例证。
5. 地球上主要有哪些群落类型？它们各自有什么特征？
6. 为什么生态系统中的能量流动具有单向性特征？
7. 请从能量金字塔和生物量金字塔角度解释为什么要控制人口快速增长。
8. 生物多样性是衡量人类可持续发展的重要指标，为什么？
9. 从生态系统能量流动、平衡和环境保护的角度讨论可再生能源的主要类型和研究发展可再生能源的重要意义。
10. 请讨论，我们每一个人为维持生态平衡和可持续发展可以做些什么。

练习题

1. 名词解释：

环境 生态学 生态系统 生物圈 种群 群落 生态因子 生态幅 广适性生物 狹适性生物
光饱和点 种群密度 样方 标记-再捕捉方法 种群分布型 逻辑斯蒂增长模型 生态演替
顶级群落 初生演替 次生演替 生产者 消费者 分解者 食物链 食物网 能量金字塔
生物地球化学循环 生物多样性 生态位 生物入侵 最小因子法则

2. 物种多样性最丰富的生态群落类型是（ ）。

- a. 温带草原 b. 热带雨林 c. 热带草原 d. 荒漠草原

3. 下面（ ）不是生物多样性所包括的内容。

- a. 遗传多样性 b. 物种多样性 c. 生物个体数量多 d. 生态系统多样性

4. 下列（ ）特征不属于平衡的生态系统的特征。

- a. 没有人为干扰和灾害发生
b. 物流与能流相对稳定
c. 具有良好的自我调节能力
d. 具有较强的自净化能力

5. 两个物种共同生活在一起（甚至一种生物生活在另一种生物体内），相依为生，相得益彰，彼此都离不开对方，这种现象称为（ ）。

- a. 寄生 b. 共栖 c. 共生 d. 协作

6. 能量在食物链的传递中会发生巨大损失，在下列4种原因中，()是不被确认的。
- 动物排泄物中能量大部分散失于环境中
 - 食物链缺少顶级消费者
 - 不是100%的生物个体都进入食物链环节
 - 生物体自身代谢所消耗
7. 下列属于物种的密度相关因素的有()。
- 营养与食物
 - 领土
 - 天敌和竞争者
 - 上述各项
8. 小鸡在一只要长脖子的鸟飞过头顶时不再畏缩和躲藏，这是()行为的例子。
- 记忆
 - 本能
 - 适应
 - 顿悟
9. 稀树草原主要分布于()。
- 非洲
 - 南美洲
 - 大洋洲
 - 欧洲
10. 不属于大陆生物群落的是()。
- 热带雨林
 - 高原气候区
 - 极地冰原
 - 温带草原
11. 下列被称为“生态先锋”的是()。
- 地衣
 - 蕨类
 - 松树
 - 牧草
12. 下列对生态系统特征描述不正确的有()。
- 生态系统具有自我调节能力，生态系统越复杂，调节能力越强
 - 生态系统的能量流动和物质流动是循环式的
 - 生态系统中营养级数目一般不超过4~5个
 - 生态系统是一个封闭的动态系统
13. 给出正确的食物链顺序()。
- 鹰-蛇-鼠-稻
 - 鼠-蛇-稻-鹰
 - 蛇-鹰-鼠-稻
 - 稻-鼠-蛇-鹰
14. 在食物链中，生物量最多的是()。
- 生产者
 - 草食动物
 - 初级消费者
 - 顶级消费者
15. 在生物地球化学循环中，下述()没有气体成分参与，而只涉及到从陆地到海洋沉积、又从海洋沉积到陆地反复循环。
- 碳循环
 - 氮循环
 - 磷循环
 - 水循环
16. 下列描述不正确的是()。
- 越发达的国家对热带雨林的破坏越少
 - 热带雨林的破坏使全球生物多样性受到了严重破坏
 - 热带雨林的破坏使热带土壤不能再长期支持农业
 - 热带雨林的破坏增加了全球变暖的威胁

相关网站

- <http://www.ceh.ac.uk/>
- <http://www.ecologycenter.org/>
- <http://cgee.hamline.edu/see/>
- <http://commtechlab.msu.edu/sites/dlc-me/>
- <http://www.ecology.com/>