



中国科学院大学研究生教材系列

# 生态基因组学

康乐 主编

 科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

中国科学院大学教材出版中心资助

# 生态基因组学

康 乐 主编



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

生态基因组学是研究生物基因组对环境响应和适应的学科,是生态学和基因组学交叉、融合的结果。本书是我国第一部关于生态基因组学的专著,阐述了生态基因组学的概念、起源和发展历史,也介绍了生态基因组学研究的方法和技术。书中的57位作者根据自己的研究方向和对象,分别撰写了生态基因组学研究的热点案例,涉及生态适应性、行为、免疫、物种形成、种间关系、表观遗传调控及肠道微生物相关的生态基因组学研究进展和展望,同时也涉及水生生态系统、生态环境与流感病毒、人体疾病相关的生态基因组等应用实例。本书内容广泛、图文并茂、参考文献丰富。

本书可供生物学、生态学、遗传学专业的本科生和研究生阅读,也可供生命科学、环境科学、医学、基因组学等领域的研究人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

生态基因组学/康乐主编. —北京:科学出版社, 2019.9  
ISBN 978-7-03-062082-8

I. ①生… II. ①康… III. ①基因组—研究 IV. ①Q343.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第181052号

---

责任编辑:李悦 付丽娜 / 责任校对:郑金红

责任印制:吴兆东 / 封面设计:刘新新

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019年9月第一版 开本:787×1092 1/16

2019年9月第一次印刷 印张:27 1/2

字数:650 000

定价:268.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 《生态基因组学》编辑委员会

第1章	康乐				中国科学院动物研究所
第2章	杨鹏程				中国科学院北京生命科学研究院
第3章	冀培丰	赵方庆			中国科学院北京生命科学研究院
第4章	马川				中国农业科学院蜜蜂研究所
第5章	邓晔	王朱珺	刘洋荧	魏子艳	中国科学院生态环境研究中心
第6章	陈兵				中国科学院动物研究所
第7章	马宗源				中国科学院北京生命科学研究院
第8章	郭伟	任姐妮			中国科学院动物研究所
第9章	王宪辉	朱丹	李贝贝		中国科学院动物研究所
第10章	王云丹				中国科学院动物研究所
第11章	王举梅	程阳	林哲	江红	中国科学院动物研究所
	邹振				
第12章	杨美玲	王艳丽	宋天琪		中国科学院动物研究所
第13章	刘春香				中国科学院动物研究所
第14章	郭亚龙				中国科学院植物研究所
第15章	张晓明	黄娟	刘艳	杜娟	中国科学院动物研究所
	徐彦卓				
第16章	姜枫	王慧敏	刘晴		中国科学院北京生命科学研究院
第17章	魏佳宁				中国科学院动物研究所
第18章	卢虹	崔峰			中国科学院动物研究所
第19章	温丹	董方方	郑爱华		中国科学院动物研究所
第20章	赵婉	崔峰			中国科学院动物研究所
第21章	张莉莉				中国科学院微生物研究所
第22章	胥丹丹	王闪闪	鲁敏	孙江华	中国科学院动物研究所
第23章	朱宝利	张瑞芬			中国科学院微生物研究所
第24章	高养春	熊薇	陈义永	赵研	中国科学院生态环境研究中心
	李世国	战爱斌			
第25章	施一	王敏			中国科学院微生物研究所
第26章	张瑞芬	朱宝利			中国科学院微生物研究所

## 序

朋友之间，最愉快的事情莫过于共同去做一件大家都感兴趣的事情。康乐院士就是我许多朋友中难得的一位。

我最早听闻康乐的名字是在 20 世纪 90 年代，他因在生态学方面的研究获得国家自然科学奖而闻名，但那时我们并未谋面。我们真正相识是在 20 世纪 90 年代末期，华大基因中心（简称华大）成功地申请到国际人类基因组计划“1%项目”，但经费一直没有落实。康乐作为当时中国科学院生命科学与生物技术局的负责人，为我们项目的完成给予了道义、政策和经费上的大力支持。不久，在他的积极建议下，华大基因中心正式纳入中国科学院研究机构序列。随后，华大相继完成了水稻基因组、家蚕基因组、人类基因组“单体型计划”等一系列基于中国生物资源的基因组项目。那时，康乐代表中国科学院负责督促和检查项目的完成情况，他几乎每周都去华大基因中心。华大搬迁到深圳也得到了康乐的理解和支持。我当时就认为他是一位非常有担当、有见解、懂科学的学者型领导。

我的成长经历使我对我国的生态环境问题有着天然的亲近感。在我的印象中，生态学更多的是一种理论性、思辨性和在旷野中开展的宏观生物学研究。但是，康乐及其团队的研究彻底颠覆了我对生态学的认识。2004 年他在《美国科学院院报》上发表了第一篇生态基因组学的文章，立即引起国际社会的高度反响。这是他给我的第一个惊喜，原来生态学问题可以用基因组学方法去解决。随后几年，康乐团队在生态基因组学领域发表了大量的系列文章，国际同行见到我时每每提起康的工作，这是第二个惊喜。让我更感到吃惊的是，康乐团队竟领先世界完成了当时最大的动物基因组——飞蝗基因组的测序和深度分析，阐明了飞蝗迁飞、食性和群聚的基因组基础。今天，在他的组织和引领下，康乐团队完成了《生态基因组学》的专著。我真的相信了，在基因组学迅速发展的今天，基因组学能为生态学、环境科学服务。

在认真阅读了康乐院士撰写的第 1 章“生态基因组学：当生态学遇到基因组学”相关内容后，我对他深入挖掘这个新兴学科的起源和发展的行为感到钦佩，更被他对两个学科融合的内在科学逻辑所折服。这一章告诉我们生态基因组学绝不是生态学和基因组学的机械结合，而是两个独立学科发展、交叉，最终走向融合的必然。生态基因组学的许多研究方向对生命科学来讲都极具挑战性，是一门典型的交叉科学。

通读全书，发现该书的内容极为丰富，共有 26 章，由中国科学院动物研究所、植物研究所、微生物研究所、生态环境研究中心和北京生命科学研究院（简称北京生科院）的 57 位科学家撰写。书中既介绍了生态基因组学的原理和方法，又列举了很多生态基因组学研究的热点案例。书中还包括了生物适应生物环境和非生物环境的基因组学、行为生态的基因组学、生态免疫学、物种形成的基因组学、生物与寄主和宿主互作的基因

组学，以及小 RNA 和非编码 RNA 表达调控的生态基因组学、肠道生态基因组学等研究进展和展望；也涉及水生生态系统、生态环境与流感病毒、人体微生物组与人体慢性疾病的基因组学研究。该书最大限度地保障了著作的理论性、实践性和前沿性，同时也提出了生态基因组学未来的研究方向和挑战，非常值得研读。

我从事基因组学研究多年，曾为我国基因组学的发展奔走、呼吁。虽然我与该书中的绝大部分作者还没有直接的科研合作，但《生态基因组学》一书的出版让我感到由衷的高兴并深受鼓舞！中国的基因组和生态基因组学能够在世界上占有一席之地绝不是偶然的。实际上，我们都在不同方向、领域和研究单位从事着共同的事业，基因组学不孤单！士不可以不弘毅，任重而道远。

匆匆书之，是为序。

杨焕明

2018年8月于北京

## 前 言

完成一部关于生态基因组学的专著无疑是具有挑战性的。生态学和基因组学是生物学中两个领域拓展最快的学科，它们的结合势必为生命科学打开更为广阔的天地。

生态学是研究生物与环境之间相互关系和作用的科学。生物与其所在环境不断地进行着能量、物质和信息的交流。这就要求我们认识生物与环境的关系不能仅仅局限于经典生态学中对生物分布和丰富度的研究。目前生态学更加注重强化科学发现与机制认识，强调多过程、多尺度、多学科的综合研究，关注系统模拟与科学预测，重视服务社会需求。从发展趋势看，全球变化生态学、生态系统服务、极端生境生态学与退化生态系统恢复重建、生物多样性保护、生物入侵机制与控制、生物地球化学循环、水资源管理生态学、传染病生态和进化、可持续发展生态学等将成为生态学重点关注的问题和领域。因此，生态学可为未来人类与自然生态系统共存提供理论依据和行动指南。但是，当把测定生态系统的复杂性尺度逐步扩大时，我们发现对生物与其环境相互作用的机制性认识在减弱。把许多看起来相关的事情转化为阐明它们的因果性必然会拓展我们的知识和指导我们的管理实践。

基因组学是研究生物基因组的组成，基因组内各基因的精确结构、相互关系及表达调控的科学。基因组学、转录组学、蛋白质组学与代谢组学等一同构成系统生物学的组学(omics)生物学基础。基因组学出现于20世纪80年代，20世纪90年代随着几个模式物种基因组计划的启动，基因组学取得了长足发展。基因组学已经成为生命科学中发展最快、影响最大的前沿学科之一。它主要研究基因组表达及调控、基因信息的识别和鉴定、基因功能信息的提取和鉴定、基因多样性分析、比较基因组学等。以基因组精细结构注释、基因组功能多样性和复杂性阐释为核心的基因组学已成为生命科学的重点发展方向。同时，我们看到，基因组学的发展也体现在单细胞测序、非编码RNA的功能及三维基因组等新的方向。当前国际上正在开展的国际免疫基因组协作计划、微生物基因组计划及以个体化基因组为标志的精准医学，都充分说明基因组学在农业、环境和人类健康研究中有巨大的生命力和引导性作用。

生态基因组学是生态学和基因组学发展过程中的自然融合，是一次新的综合。这不能简单地概括为用基因组学的方法研究生态学问题，其中最重要的一点是，生态基因组学将生态学问题由相关性研究提升到机制性研究。例如，在基因组水平可以更清楚地展示动植物生活史的类型、转变和特征，从而将基因组的变异与生态学的性状联系起来。地球上的生物多样性是生物与生物及生物与环境长期相互作用的结果。生态基因组学为深刻理解环境条件影响下表型与基因型的复杂关系提供了可行途径。对于表型可塑性研究，长期以来仅限于数量遗传特征的统计分析。生态基因组学的研究使得我们更清楚地展现不同表型背后的基因组程式。结合转录组及功能基因研究，我们能够更清晰地阐明

环境作用下表型可塑性的适应机制及进化过程。生态基因组学将基因型与表型变异联系起来，例如，亲代的生活经历可影响其后代的表型性状和生理状态，这就使得跨代的表观遗传的概念在生态学中得到了很好的应用。

生态基因组学使生态学的研究获得了新的拓展。基因的水平转移，使我们对物种的形成和种间相互关系有了更加明确的证据和清晰的线路。小 RNA、非编码 RNA，以及蛋白质磷酸化、甲基化、乙酰化研究，加深了我们对表观遗传机制如何影响生态学性状的理解，即生物个体如何成功地应对迅速变化的环境条件。生态基因组学对于解释生物的适应性分化也有重要的作用，特别是在涉及生物在不同的寄主、胁迫环境和人类改变的环境条件下，生态基因组学能从分子水平和机制上给出合理的解释。另外，生态基因组学对于解释微生物基因组在适应性、生态功能和趋同进化等方面具有重要的意义。

生态基因组学的发展，使生态学的理论与实践得到新的应用。环境因素对生物的影响是多方面的，过去生态学研究更多地考虑到对种群及其以上生物水平的影响。生态基因组学的研究成果将加深我们对环境因子如何塑造基因和蛋白质网络的认识，试图回答生态学和进化中最具挑战性的问题。在应用层次上，生态基因组学提升我们保护生物、控制有害生物、管理外来物种的水平，为预防人类疾病的发生和流行提供重要的理论依据和技术支撑。另外，通过在严格控制的条件下进行生态基因组学研究，可为空间生物学和航天器生命支持系统提供更加精准的理论支持。

本书邀请了我国 57 位从事生态学、基因组学、生态基因组学研究的学者和专家分别撰写相关章节，集中反映了国际上生态基因组学的最新进展及他们在该领域的研究成果，是我国第一部生态基因组学领域的专著。我们希望，本书的出版为发展我国的生态基因组学贡献力量，希望国内外同行高度关注和支持该领域的研究。生态基因组学的发展，必将产生更多的新发现、新理论、新技术，从而进一步丰富这一领域的内容，提高其深度、广度。

康 乐

2018 年 6 月 6 日于北京



# 目 录

## 第一部分 生态基因组学概论

第 1 章 生态基因组学：当生态学遇到基因组学	3
1.1 什么是生态基因组学	3
1.2 生态学的发展趋势	3
1.3 生态基因组学的形成过程	6
1.4 生态基因组学主要研究的问题和挑战	8
1.5 生态基因组学研究的实例——飞蝗表型可塑性研究	9
参考文献	12
第 2 章 高通量测序技术及其在生态基因组学上的应用	15
2.1 高通量测序技术介绍	15
2.2 测序技术在生态基因组学研究中的应用	21
2.3 小结	31
参考文献	32
第 3 章 生态基因组学研究中的生物信息学方法	34
3.1 高通量测序数据的质控分析	34
3.2 遗传变异的识别	35
3.3 非模式生物基因组的拼接	37
3.4 非模式生物中基因识别的方法	39
3.5 系统发育树构建	41
3.6 微生物生态基因组研究的常用工具	42
参考文献	44
第 4 章 细胞器基因组及其在生态学和进化学中的应用	48
4.1 细胞器基因组的结构及特点	49
4.2 细胞器基因组测序及分析	51
4.3 线粒体和叶绿体基因组的应用	53
4.4 小结	57
参考文献	58
第 5 章 微生物生态功能基因检测方法	61
5.1 功能基因的分子检测方法	61
5.2 碳循环功能基因的分子检测	63

5.3 氮循环功能基因的分子检测	68
5.4 小结	73
参考文献	74

## 第二部分 生态基因组学的热点科学问题

<b>第6章 环境胁迫适应的生态基因组学</b>	83
6.1 生物对环境胁迫的响应与适应: 总论	83
6.2 温度胁迫适应的生态基因组学	84
6.3 低氧胁迫适应的生态基因组学	85
6.4 全球变化/全球变暖的生态基因组学	87
6.5 环境胁迫的表观遗传: 表观基因组学	89
6.6 热激蛋白家族与环境胁迫响应	91
6.7 展望	93
参考文献	93
<b>第7章 组学与昆虫神经行为学——以飞蝗型变的神经行为学机制研究为例</b>	98
7.1 神经行为学	98
7.2 昆虫神经行为学	100
7.3 飞蝗行为型变与行为决策	100
7.4 基于组学的飞蝗行为型变的神经行为学机制研究	101
7.5 基于组学数据发现的单胺类神经递质对飞蝗行为型变的调节	105
7.6 展望	108
参考文献	108
<b>第8章 昆虫生殖调控及适应的生态基因组学</b>	112
8.1 基因组及生殖相关基因	112
8.2 生殖内分泌调控通路	114
8.3 生殖调控的表观作用机制	118
8.4 生殖调控与环境适应	120
8.5 生殖调控的应用	123
参考文献	125
<b>第9章 昆虫多型现象的基因组学研究</b>	131
9.1 昆虫多型现象	131
9.2 多型性昆虫的基因组测序和比较研究	133
9.3 昆虫多型现象的分子调控机制	136
9.4 昆虫多型现象的表观调控机制	141
9.5 展望	143
参考文献	143

<b>第 10 章 生态免疫学</b> .....	148
10.1 物种免疫系统多样性 .....	148
10.2 生态因子对免疫系统的影响 .....	149
10.3 宿主免疫防御策略的生态适应性 .....	152
10.4 群体性免疫 .....	154
10.5 密度依赖的预先免疫分子机制 .....	155
参考文献 .....	156
<b>第 11 章 昆虫免疫组学</b> .....	160
11.1 模式昆虫的免疫组学 .....	160
11.2 卫生昆虫的免疫组学 .....	168
11.3 免疫互作及免疫进化 .....	173
11.4 免疫基因的比较和进化 .....	176
11.5 展望 .....	179
参考文献 .....	180
<b>第 12 章 不同生态环境中昆虫体色的多型性及其调控机制</b> .....	187
12.1 环境对昆虫体色的影响 .....	187
12.2 昆虫体色多型的内分泌调控机制 .....	192
12.3 昆虫体色多型的遗传机制 .....	194
参考文献 .....	201
<b>第 13 章 生态基因组学在动物物种形成研究中的应用</b> .....	205
13.1 全基因组已被揭示的主要动物类群及基因组大小的演化 .....	205
13.2 动物物种形成的特点和机制 .....	207
参考文献 .....	218
<b>第 14 章 植物适应性进化的研究</b> .....	221
14.1 植物的适应性 .....	222
14.2 植物适应性进化的研究方法 .....	223
14.3 植物适应性进化的研究进展 .....	223
14.4 植物适应性进化研究中存在的问题 .....	227
参考文献 .....	228
<b>第 15 章 植物对环境中生物胁迫的组学防御反应</b> .....	231
15.1 病原相关分子对防御基因的系统激活 .....	231
15.2 R 基因的系统激活及抗性作用 .....	233
15.3 RNA 沉默对病原入侵的直接及间接防御 .....	235
15.4 局部抗性与系统获得性抗性 .....	240
15.5 抗性反应的跨代传递机制 .....	243
参考文献 .....	245

<b>第 16 章 生态适应过程中非编码 RNA 的表达调控机制</b> .....	250
16.1 以长链非编码增强子 RNA 为核心的表达调控机制 .....	250
16.2 以短链非编码 piRNA 为核心的表达调控机制 .....	253
16.3 生态适应过程中非编码 RNA 的表达调控机制 .....	258
参考文献 .....	261
<b>第 17 章 植物-昆虫互作的生态基因组学研究</b> .....	265
17.1 在基因组水平研究植物对昆虫取食的反应和对策 .....	265
17.2 利用基因组芯片研究植物与植物化学通讯的机制 .....	273
17.3 利用基因组研究昆虫嗅觉对寄主信息流的行为适应机制 .....	280
17.4 植食性昆虫寄主专化的基因组适应机制 .....	281
参考文献 .....	284
<b>第 18 章 唾液蛋白调控昆虫适应植物的生态基因组学研究</b> .....	288
18.1 昆虫唾液蛋白的组成 .....	288
18.2 唾液蛋白在昆虫与植物互动中的作用 .....	297
18.3 唾液蛋白在昆虫寄主转换中的作用 .....	300
参考文献 .....	302
<b>第 19 章 吸血节肢动物与哺乳动物的互作基因组学</b> .....	307
19.1 吸血节肢动物与病原传播 .....	307
19.2 吸血节肢动物与哺乳动物互作 .....	310
参考文献 .....	315
<b>第 20 章 昆虫-病毒互作的生态基因组学研究</b> .....	319
20.1 昆虫作为宿主与病毒的关系 .....	319
20.2 昆虫作为介体与病毒的关系 .....	326
参考文献 .....	333
<b>第 21 章 介体昆虫肠道微生态与病原微生物的传播</b> .....	337
21.1 昆虫肠道结构与功能 .....	337
21.2 肠道菌群的基本功能 .....	339
21.3 昆虫细胞内共生菌 .....	342
21.4 肠道菌群的结构及其在宿主体内的维持 .....	343
21.5 介体昆虫肠道菌群与病原微生物的传播 .....	345
参考文献 .....	347
<b>第 22 章 宏基因组在昆虫-植物-伴生微生物互动中的应用</b> .....	354
22.1 伴生微生物群落结构与重要功能关联分析 .....	356
22.2 伴生微生物宏基因组解析与重要功能预测 .....	359
参考文献 .....	362

### 第三部分 生态基因组学的未来科学问题及应用

<b>第 23 章</b>	<b>分子生态学的兴起与宏基因组学的诞生</b> .....	367
23.1	人体分子生态学的兴起 .....	367
23.2	宏基因组学的诞生 .....	368
23.3	宏基因组学技术在人体微生态研究中的应用 .....	369
23.4	宏基因组学技术在人体微生态研究中的展望 .....	374
	参考文献 .....	374
<b>第 24 章</b>	<b>水生生态系统的宏基因组学研究——环境胁迫的生态效应及方法学研究</b> ....	376
24.1	水生生态系统遭受的环境胁迫 .....	376
24.2	利用宏基因组学技术研究环境胁迫产生的生态学效应 .....	379
24.3	水生生态系统的宏基因组学研究存在的问题及可能的解决方案 .....	382
24.4	小结与展望 .....	388
	参考文献 .....	388
<b>第 25 章</b>	<b>生态环境与流感病毒基因的变异</b> .....	393
25.1	引言 .....	393
25.2	流感病毒概述 .....	394
25.3	流感病毒的天然宿主 .....	396
25.4	流感病毒的传播途径 .....	397
25.5	流感病毒的基因变异 .....	399
25.6	候鸟迁徙与流感病毒传播 .....	403
25.7	生态环境改变对流感病毒传播的影响 .....	404
25.8	小结 .....	405
	参考文献 .....	406
<b>第 26 章</b>	<b>人体微生物组与慢性疾病</b> .....	412
26.1	人体微生物组 .....	412
26.2	肠道菌群：新发现的人体器官 .....	413
26.3	人体肠道菌群和慢性疾病 .....	417
26.4	调节肠道菌群防治慢性病 .....	423
26.5	小结 .....	425
	参考文献 .....	425

## 第一部分 生态基因组学概论



# 第1章 生态基因组学：当生态学遇到基因组学

## 1.1 什么是生态基因组学

生态学 (ecology) 和基因组学 (genomics) 都是生命科学领域最重要的分支学科。生态学是研究生物与环境之间相互关系和相互作用的科学。基因组学是研究基因组 (genome) 的科学, 特别强调研究基因组的结构和功能。基因组的结构特征是序列化和数字化的, 功能则主要体现在表达和调控方面, 基因组学更强调结构和功能密不可分的相互关系 (杨焕明, 2016)。

什么是生态基因组学 (ecological genomics) 呢? 与其他生物学名词类似, 生态基因组学也有许多不同的定义。较早和较相关的定义是 Feder 和 Mitchell-Olds (2003) 提出的进化和生态功能基因组学 (evolutionary and ecological functional genomics) 的概念, 其基本含义是在自然环境和种群中, 聚焦影响生存成功和进化适合度的基因。我们于 2004 年提出生态基因组学 (ecological genomics 或 ecogenomics) 的定义: 用基因组学的原理和方法研究生态学问题 (Kang et al., 2004)。2006 年, 国际上生态基因组学的第一本书籍出版, 编著者认为生态基因组学是一个分支学科, 尽管瞄准的是生物有机体与生物和非生物环境间的关系, 但强调基因组的结构和功能的密切联系 (Straalen and Rolofs, 2012)。一个类似的概念是强调自然种群的适应性研究, 生态基因组学研究试图揭示生物有机体对环境的适应性响应的遗传机制, 特别是通过基因组的结构和功能方面理解其机制 (Eads et al., 2008)。堪萨斯州立大学 (Kansas State University) 有专门的研究团队, 在他们的网站上把生态基因组学定义为: 在生态和进化时间的尺度上研究一个或多个基因组群如何与环境相互作用。一些微生物学家认为, 生态基因组学实际在性质上是跨学科的, 它使生态学家能够通过基因组学来阐明生物多样性的机制 (Landry and Aubin-Horth, 2013)。最近, 一个较新的定义被提出: 生态基因组学试图阐明基因组对环境变化的反应, 以及基因组的变异如何塑造有机体对环境的响应 (Abbot, 2017)。

仔细留意不难发现, 上述这些定义有一些区别, 但都大同小异。梳理生态基因组学定义演变的过程, 也能对这个学科的发展有所了解。因为这个演变过程实际上反映了科学发展的时代特征, 科学家的特定研究领域、生物类群, 以及研究手段的发展和变化。这其中有一个共同的特点, 即这些定义是与进化、种群和基因组紧密联系的, 强调的问题是基因组与环境的相互作用, 研究手段是基因组学相关的技术, 最终的目的是更好地理解有机体在生态系统中所发挥的作用。

## 1.2 生态学的发展趋势

1866 年德国动物学家 Ernst Heinrich Haeckel 首次把生态学定义为“研究生物与其环



境之间相互关系的科学”，特别是动物与其他生物之间的有益和有害关系，从此揭开了生态学发展的序幕。1877年，德国动物学家 Mobius 提出了生物群落 (biocenosis) 的概念，意指生活在一个栖境中的相互作用的所有有机体；1905年，美国植物学家 Clements 提出植物群落的概念。1935年英国的 Tansley 提出了生态系统的概念，即环境中不仅生物之间有相互作用，而且这种相互作用也发生在无机成分之间。之后，美国的年轻学者 Lindeman 在对 Mondota 湖生态系统详细考察之后，提出了生态金字塔能量转换的“十分之一定律”。20世纪50年代之后，生态学定义中又增加了系统生态的观点，把生物与环境的关系归纳为物质流动及能量交换；20世纪70年代以来则进一步概括为物质流、能量流及信息流。生态学成为一门有自己的研究对象、任务和方法的比较完整和独立的学科。

生态学是生命科学领域20世纪发展最快的学科之一。20世纪50年代以来，生态学汲取了数学、物理、化学和工程技术科学的研究成果，向精确定量方向发展并形成了自己的理论体系。数理化方法、精密仪器和电子计算机的应用，使生态学工作者有可能更广泛、深入地探索生物与环境之间相互作用的物质基础，从而对复杂的生态现象进行定量分析；整体概念的发展，产生出生态学若干新分支学科。生态学家感兴趣的问题包括：生物多样性、分布、生物量和种群动态，以及种间的合作与竞争。生态系统生态学是研究生物系统和非生物系统的相互作用。生态系统过程主要涉及初级生产过程、成土作用、营养循环、生态位构成等调控通过环境的能量和物质流。这个过程被生物有机体协同其生活史特征所维持。生物多样性是指物种、基因和生态系统的变化，这种多层次的集合加强了生态系统的服务功能。生态学与环境科学和自然历史研究并不相同，而与进化生物学、遗传学、行为学有紧密的联系。生态学家最关心的是更好地理解生物多样性如何影响生态功能。因此，生态学家试图解释：①生命过程，相互作用和适应性；②生物群落中物质和能量的流动；③生态系统的演替；④环境中有机体和生物多样性的分布和丰富度。

由于地球上的生态系统大都受人类活动的影响，社会经济生产系统与生态系统相互交织，形成了庞大的复合系统。随着社会经济和现代工业化的高速发展，自然资源、人口、粮食和环境等一系列影响社会生产和生活的问题日益突出。1962年，美国海洋生物学家 Rachel Carson 出版震惊世界的生态学著作《寂静的春天》，提出了农药滴滴涕 (DDT) 造成的生态公害与环境保护问题，唤起了公众对环保事业的关注。

为了寻找解决这些问题的科学依据和有效措施，国际生物科学联合会 (IUBS) 制定了“国际生物学计划” (IBP)，对陆地和水域生物群落进行生态学研究。1972年联合国教育、科学及文化组织等继 IBP 之后，设立了人与生物圈 (MAB) 国际组织，制定“人与生物圈”规划，组织各参加国开展森林、草原、海洋、湖泊等生态系统与人类活动及农业、城市、污染等有关的科学研究。许多国家都设立了生态学和环境科学研究机构。1986年由国际科学联合会 (ICSU) 建立国际地圈生物圈计划 (International Geosphere-Biosphere Program, IGBP)，认识控制整个地球系统相互作用的物理、化学和生物学过程；理解和描述支持生命的独特环境；理解和描述发生在该系统中的变化及人类活动对它们的影响方式。1980年由世界自然保护联盟 (IUCN)、联合国环境规划署 (UNEP)、