

# 生态系统 健康学

Ecosystem Healthics  
—Theory and Application

## ——理论与实践

王庆礼 陈 高 代力民 于大炮  
姬兰柱 佟富春 邓红兵

著



辽宁科学技术出版社  
LIAONING SCIENCE AND TECHNOLOGY PUBLISHING HOUSE

# 生态系统健康学

——理论与实践

## Ecosystem Healthics

——Theory and Application

王庆礼 陈 高 代力民 于大炮 姬兰柱 佟富春 邓红兵 著

 辽宁科学技术出版社

沈 阳

图书在版编目 (CIP) 数据

生态系统健康学：理论与实践/王庆礼等著. — 沈阳：  
辽宁科学技术出版社，2007.12  
ISBN 978-7-5381-4773-5

I. 生… II. 王… III. 生态系统—健康—研究  
IV. X171

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 069508 号

---

出版发行：辽宁科学技术出版社

(地址：沈阳市和平区十一纬路 29 号 邮编：110003)

印刷者：沈阳市北陵印刷厂

经销者：各地新华书店

幅面尺寸：184mm×260mm

印 张：17.25

插 页：4

字 数：530 千字

印 数：1~500

出版时间：2007 年 12 月第 1 版

印刷时间：2007 年 12 月第 1 次印刷

责任编辑：姚福龙 邱利伟

封面设计：达 达

版式设计：于 浪

责任校对：周 文

---

书 号：ISBN 978-7-5381-4773-5

定 价：45.00 元

联系电话：024-23284360

邮购热线：024-23284502

E-mail: lkzsb@mail.lnpgc.com.cn

http://www.lnkj.com.cn

## 前 言

人类自 18 世纪工业革命以来,开始了规模宏大的工业化与现代化进程。一方面,人类自身由此逐步摆脱了愚昧贫穷,走向文明幸福;另一方面,人类陷入了日益严重的生存危机。其中最为严重的是因破坏环境而引起的生态危机,如水土流失、环境污染、土地荒漠化、生物多样性丧失、淡水资源日益匮乏、能源短缺等,使人类现在与未来面临越来越严重的威胁。更为重要的是,生态危机至今仍在继续蔓延而未得到有效的遏制。人类对于眼前利益的不合理追求,已经严重危及地球生命支持系统和人类的生存和可持续发展。

正是在这种严峻的形势下,20 世纪 60 年代以来,许多有识之士奋起敲响生态危机的警钟。1972 年斯德哥尔摩联合国人类环境大会和 1992 年里约热内卢世界环境与发展大会的召开标志着人类将生态环境问题提升到了史无前例的高度。然而,解决这些新情况、新问题,已不再是单一的学科领域所能做到的,一系列新的学科分支和多学科交叉领域应运而生,生态系统健康(学)是其中最活跃的亮点之一。

生态系统健康是一门交叉学科,它综合社会科学、自然科学和健康科学的知识,研究生态系统管理的预防性的、诊断性的和预兆性的特征以及生态系统健康与人类健康之间的关系。生态系统健康学是当代迅速发展的科学,在我国,生态系统健康学的研究尚处在摸索起步阶段。

长白山国家级自然保护区建立于 1960 年,面积近 20 万  $\text{hm}^2$ ,是我国建立最早的自然保护区之一,也是首批加入“国际人与生物圈”的保护区,是目前面积最大、保存最为完好的温带森林生态系统。然而,与此形成鲜明对比的是,近 100 年来位于保护区周边的林业局对森林资源的不合理采伐,使长白山地区地带性森林植被,特别是珍贵原始的阔叶红松林生态系统已经遭到严重破坏,资源已经枯竭,维系这一地区生物多样性的环境条件恶化,许多珍稀动植物面临灭绝,林下贵重的经济植物,如阔叶红松林下的“东北三宝”之一的人参,已经难觅踪迹了。由于无法从林下获得充足的经济来源,林场和林区职工的收入无法得到保障,进而加剧了对森林资源的破坏,严重影响了林区的可持续发展。因此,探讨森林生态系统的健康与人类的健康对东北地区乃至全国实现经济和社会的可持续发展具有重要的理论与实践意义。

自 2000 年开始,我们就在长白山开始了生态系统健康方面的研究和探索,当时国内外对生态系统健康评价(评估)的研究很少,我们依托中国科学院长白山森林生态系统定位研究站,在国家科技支撑项目(No.2006BAD03A09)、中国科学院东北振兴计划项目(辽河流域生态建设总体规划与综合治理模式示范)、国家自然科学基金项目(No.30170744 & 70373044)等的资助下,在对国内外研究总结的基础上,先后以高等植物、苔藓、昆虫和土壤动物等指示物种,从生态系统结构和生态服务功能的层面对生态系

统健康进行了评估，并创造了健康距离 (HD) 的评价方法。

本书共分 6 章，从生态系统健康研究的兴起，谈到环境问题，然后探讨了生态系统的学科框架及典型的生态系统研究，并总结了我们对长白山阔叶红松林健康的多年研究成果，最后谈到维持生态系统健康和人类健康的科学发展观。

由于生态系统健康学是一门多学科交叉的科学，涉及内容广泛，并与社会、经济及伦理问题紧密相关，有些问题还存在诸多争议，限于作者的能力和对生态系统健康的理解水平，不当和错误之处，敬请读者批评指正。

著 者

2007 年 4 月

# 目 录

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第一章 生态系统健康学的兴起 .....            | 1  |
| 1. 生态系统生态学 .....                | 2  |
| 1.1 生态学及其特点 .....               | 2  |
| 1.2 什么是生态系统 .....               | 3  |
| 1.2.1 生态系统的结构 .....             | 5  |
| 1.2.2 生态系统的功能 .....             | 5  |
| 1.2.3 生态系统的特征 .....             | 8  |
| 1.3 生态系统的研究 .....               | 9  |
| 1.4 生态系统服务——完善对生态系统的认识 .....    | 11 |
| 2. 生态系统健康学的产生 .....             | 14 |
| 2.1 研究简史 .....                  | 15 |
| 2.1.1 生态系统健康意识的萌芽——土地健康概念 ..... | 15 |
| 2.1.2 生态系统健康概念的确立 .....         | 16 |
| 2.1.3 四次国际性会议 .....             | 16 |
| 2.1.4 目前的发展 .....               | 18 |
| 2.2 健康的生态系统和生态系统健康 .....        | 19 |
| 2.2.1 不同角度的定义 .....             | 19 |
| 2.2.2 健康的生态系统与生态系统健康 .....      | 23 |
| 2.3 对生态系统健康学的争论 .....           | 26 |
| 3. 相关的生态系统健康组织 .....            | 28 |
| 3.1 水生生态系统健康和管理协会 .....         | 28 |
| 3.2 国际生态系统健康学会 .....            | 29 |
| 第二章 环境问题与生态系统 .....             | 30 |
| 1. 环境问题 .....                   | 30 |
| 1.1 全球气候变化 .....                | 31 |
| 1.2 臭氧层的耗损与破坏 .....             | 34 |
| 1.3 空气污染和酸雨 .....               | 35 |
| 1.4 氮负荷 .....                   | 37 |
| 1.5 土地荒漠化 .....                 | 39 |
| 1.6 有毒化学品和危险废物的转移 .....         | 40 |
| 2. 生态破坏对健康生态系统的影响 .....         | 41 |
| 2.1 淡水生态系统退化和水资源危机 .....        | 41 |

|       |                                    |    |
|-------|------------------------------------|----|
| 2.2   | 海洋生态系统污染和资源危机 .....                | 43 |
| 2.3   | 森林生态系统破碎化 .....                    | 44 |
| 2.3.1 | 森林减少 .....                         | 44 |
| 2.3.2 | 森林火灾和生物质燃烧 .....                   | 45 |
| 2.4   | 生物多样性降低 .....                      | 46 |
| 3.    | 环境变化与人类健康 .....                    | 48 |
| 3.1   | 环境质量与人类健康 .....                    | 49 |
| 3.2   | 城市生态系统健康与人类健康 .....                | 50 |
| 3.3   | 未来的环境、生态系统健康与人类健康 .....            | 52 |
| 3.3.1 | 不可预见的事件和科学发现 .....                 | 52 |
| 3.3.2 | 老问题意想不到的转化 .....                   | 53 |
| 3.3.3 | 忽视的问题 .....                        | 54 |
| 第三章   | 生态系统健康学的学科框架 .....                 | 56 |
| 1.    | 生态系统健康的学科框架 .....                  | 56 |
| 1.1   | 生态系统健康与生态学分支学科 .....               | 57 |
| 1.1.1 | 恢复生态学 .....                        | 57 |
| 1.1.2 | 保护生物学 .....                        | 58 |
| 1.1.3 | 景观生态学 .....                        | 59 |
| 1.2   | 生态系统健康学研究 .....                    | 62 |
| 1.2.1 | 任务和目标 .....                        | 62 |
| 1.2.2 | 理论研究的目的和意义 .....                   | 62 |
| 1.2.3 | 主要研究内容 .....                       | 64 |
| 2.    | 生态系统健康评估的思想和方法 .....               | 64 |
| 2.1   | 对生态系统状态的监测 .....                   | 65 |
| 2.2   | 生态系统健康的标准 .....                    | 66 |
| 2.3   | 生态系统健康评估的网络分析法 .....               | 67 |
| 2.3.1 | 衡量活力 .....                         | 69 |
| 2.3.2 | 测度组织 .....                         | 69 |
| 2.3.3 | 测度恢复力 .....                        | 70 |
| 2.3.4 | 定量评价生态系统健康的网络分析 .....              | 72 |
| 2.4   | 国际上通用的生态系统健康评估方法 .....             | 73 |
| 2.4.1 | 指示物种、指示类群或功能组生态系统健康评价方法 .....      | 74 |
| 2.4.2 | 指标体系生态系统健康评价方法 .....               | 74 |
| 2.5   | 对距离的理解和健康距离法——一种新的生态系统健康评价方法 ..... | 75 |
| 2.5.1 | 健康生态系统模式假设 .....                   | 76 |
| 2.5.2 | 健康生态系统的评估新方法——健康距离 (HD) 法 .....    | 76 |
| 2.5.3 | 计算方法 .....                         | 76 |
| 2.6   | 发展与展望 .....                        | 77 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 3. 生态系统健康管理 .....              | 79  |
| 3.1 生态系统管理的内涵 .....            | 79  |
| 3.2 生态系统健康管理的若干原则 .....        | 80  |
| 3.3 生态系统健康与生态系统管理 .....        | 82  |
| 4. 生态系统健康与人类健康 .....           | 84  |
| 第四章 典型生态系统健康学研究 .....          | 87  |
| 1. 森林生态系统健康学研究 .....           | 87  |
| 1.1 森林生态系统健康的概念 .....          | 88  |
| 1.2 对森林生态系统健康的理解 .....         | 91  |
| 1.3 森林生态系统健康评估内容 .....         | 93  |
| 1.4 森林生态系统健康研究途径 .....         | 94  |
| 1.4.1 长期研究和环境监测计划 .....        | 94  |
| 1.4.2 时空互代 .....               | 96  |
| 1.4.3 历史途径 .....               | 96  |
| 1.4.4 经济价值评估 .....             | 97  |
| 1.4.5 其他途径 .....               | 98  |
| 1.5 森林生态系统健康评估方法 .....         | 99  |
| 1.5.1 生态指示者法 .....             | 100 |
| 1.5.2 指标系统法 .....              | 105 |
| 1.5.3 健康的基准 .....              | 105 |
| 1.6 森林生态系统健康监测的几个实例 .....      | 106 |
| 1.7 小结 .....                   | 107 |
| 2. 水生生态系统健康学研究 .....           | 108 |
| 2.1 影响水生生态系统健康的原因 .....        | 108 |
| 2.2 水生生态系统健康评价方法 .....         | 109 |
| 2.2.1 生态指示者法 .....             | 109 |
| 2.2.2 指标体系法 .....              | 111 |
| 2.3 水生生态系统健康研究实例 .....         | 114 |
| 2.3.1 湖泊生态系统健康计划 .....         | 114 |
| 2.3.2 河流生态系统健康监测与评估 .....      | 115 |
| 3. 湿地生态系统健康学研究 .....           | 116 |
| 3.1 湿地生态系统健康的影响因子 .....        | 116 |
| 3.2 湿地生态系统健康研究现状及发展趋势 .....    | 117 |
| 3.3 湿地生态系统类型及其生态系统健康评价指标 ..... | 118 |
| 3.3.1 湿地生态系统类型 .....           | 118 |
| 3.3.2 评价指标体系及评价方法 .....        | 119 |
| 3.4 湿地效益的存在特征 .....            | 121 |

|       |                                        |     |
|-------|----------------------------------------|-----|
| 4.    | 国际森林生态系统健康监测计划 .....                   | 123 |
| 4.1   | 美国国家森林健康监测与评价计划 (FHM) .....            | 123 |
| 4.2   | 加拿大北方森林健康监测——酸雨国家早期预警系统 (ARNEWS) ..... | 126 |
| 4.3   | 环境监测和评估计划 (EMAP) .....                 | 127 |
| 4.4   | 国家酸雨评价计划 (NAPAP) .....                 | 128 |
| 第五章   | 阔叶红松林生态系统健康研究实践 .....                  | 131 |
| 1.    | 阔叶红松林生态系统 .....                        | 131 |
| 1.1   | 阔叶红松林的分布 .....                         | 131 |
| 1.2   | 非生物环境 .....                            | 132 |
| 1.2.1 | 地质地貌 .....                             | 132 |
| 1.2.2 | 土壤 .....                               | 134 |
| 1.2.3 | 气候 .....                               | 135 |
| 1.3   | 植被特征 .....                             | 136 |
| 1.3.1 | 阔叶红松林类型 .....                          | 137 |
| 1.3.2 | 垂直植被带特征 .....                          | 139 |
| 1.3.3 | 次生植被状况 .....                           | 141 |
| 1.4   | 研究进展简述 .....                           | 147 |
| 2.    | 阔叶红松林健康评估 .....                        | 149 |
| 2.1   | 指示者评估 .....                            | 149 |
| 2.1.1 | 高等植物指示种 .....                          | 150 |
| 2.1.2 | 苔藓植物指示种 .....                          | 167 |
| 2.1.3 | 昆虫指示种 .....                            | 172 |
| 2.1.4 | 土壤动物指示种 .....                          | 180 |
| 2.2   | 功能指标系统法评估 .....                        | 191 |
| 2.2.1 | 功能指标的选择标准 .....                        | 191 |
| 2.2.2 | 功能指标的评价方法 .....                        | 192 |
| 2.2.3 | 评价阔叶红松林生态系统健康 .....                    | 194 |
| 2.3   | 评估阔叶红松林生态系统健康的综合自然指标系统法 .....          | 199 |
| 3.    | 健康距离 (HD) 法 .....                      | 203 |
| 3.1   | “健康距离”概念和方法的提出 .....                   | 203 |
| 3.1.1 | 健康生态系统模式假设 .....                       | 203 |
| 3.1.2 | 健康生态系统的评估新方法——健康距离法 .....              | 204 |
| 3.2   | 阔叶红松林生态系统健康指标体系框架 .....                | 204 |
| 3.3   | 健康距离新方法的应用实践 .....                     | 207 |
| 3.3.1 | 阔叶红松林主要干扰群落的结构健康评估 .....               | 207 |
| 3.3.2 | 健康距离法评估次生白桦林和人工林 (红松和落叶松) .....        | 209 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| <b>第六章 未来的希望——地球生态系统健康</b> | 215 |
| <b>1. 生态危机与生态文化</b>        | 215 |
| 1.1 生态文化的概念                | 216 |
| 1.2 我国传统生态文化的哲学观点          | 216 |
| 1.2.1 我国生态文化的发展            | 216 |
| 1.2.2 我国传统文化中的生态哲学智慧       | 218 |
| 1.3 生态危机的哲学根源              | 220 |
| 1.4 解决生态危机的现代哲学观点          | 221 |
| 1.4.1 我国传统文化中的现代生态哲学价值     | 221 |
| 1.4.2 马克思、恩格斯的生态哲学思想       | 223 |
| <b>2. 二十一世纪的生态伦理</b>       | 225 |
| 2.1 生态伦理概念的提出              | 226 |
| 2.2 生态伦理学的发展               | 227 |
| 2.3 科学的生态伦理观               | 228 |
| <b>3. 生存的科学观</b>           | 230 |
| 3.1 人类的发展与生态危机             | 230 |
| 3.2 盖亚 (Gaia) 假说与新的地球系统观   | 230 |
| 3.3 科学的发展观                 | 232 |
| 3.3.1 发展的人本观               | 232 |
| 3.3.2 发展的自然观               | 233 |
| 3.3.3 发展的整体观               | 234 |
| <b>附 录</b>                 | 236 |
| 附表 1 乔木树种名录                | 236 |
| 附表 2 灌木种名录及编码              | 237 |
| 附表 3 草本植物名录及编码             | 238 |
| 附表 4 长白山森林主要害虫名录           | 241 |
| 附表 5 长白山阔叶红松林土壤线虫区系组成      | 243 |
| 附表 6 长白山阔叶红松林甲螨的区系组成       | 244 |
| 附表 7 长白山阔叶红松林弹尾目区系组成       | 247 |
| <b>参考文献</b>                | 249 |

# 第一章 生态系统健康学的兴起

20 世纪自然科学的最大贡献是重新认识了人与自然的关系,并将人自身回归于大自然中。在生态和环境科学领域,生态系统健康理念的提出,作为环境管理和可持续发展的新思路、新方法,使得人类在面临全球生态环境恶化、生态系统受到前所未有的胁迫挑战的时候,寻找到了—条解决之路 (Costanza, 1992)。1992 年,在巴西举行的世界环境与发展大会上,与会各国首脑一致强调“国家间应加强合作,以保护和恢复地球生态系统的健康和完整性”。科学家们在探讨这些问题时发现,以前关于生态系统认识和管理理论与方法已显落后,不能指导解决这些问题,因此需要针对生态系统已不健康的现实,把人类活动、社会组织、自然系统及人类健康等社会、生态和经济问题进行整合研究,系统研究生态系统在胁迫条件下产生不健康的症状和机理。生态系统健康 (ecosystem health) 正是在这一背景下产生的 (Costanza, 1992; Rapport et al., 1984, 1990, 1998; Leopold, 1997)。可以说,生态系统健康是 20 世纪 80 年代末在可持续发展思想的推动下,在传统的自然科学、社会科学和健康科学相互交叉和综合的基础上发展起来的一门新学科 (McMichael & Haines, 1997)。

健康概念源于医学领域,并用于人体本身。将这个概念扩展应用于广义的生命个体也是可以理解和自然的事情。但是,若将这个概念扩展应用于生命个体以上的水平(如生态系统)则是颇有争议的。虽然许多科学家已将健康概念进一步拓展应用于生态系统、景观,甚至生物圈研究,但这并不意味着这些更高水平的系统与生命个体以同样的方式在起作用,而是意味着定义一个功能正常的、可持续的系统是可能的。同时,对那些偏离正常边界并导致功能紊乱的系统进行界定或许更容易了。虽然“健康”—词在近 10 余年才应用到生态系统和景观水平,但在许多领域,它已成为一个指导性观念象征,特别是在评价区域的海洋生态系统 (Sherman et al., 1995)、森林生态系统 (Kolb et al., 1994)、农田生态系统 (Gallopín, 1995)、荒漠生态系统 (Whitford et al., 1995) 等方面。

在生态系统水平中,健康意味着结构功能正常。地球上生态系统功能的正常发挥是全球人类普遍关心的问题,也是一个主要的社会发展目标。从生态系统观出发,一个健康的生态系统应该是稳定的和可持续的;在时间上能够维持其组织结构和自治,也能够维持其对胁迫的恢复力。从人类利益的角度看,健康的生态系统能够为维持人类社会的各种生态系统提供服务,如食物、纤维、饮用水、清洁空气、废弃物吸收并再循环的能力等。因此,结合生态系统观和人类发展观来看,健康的生态系统能够维持它们的复杂性、稳定性,同时能满足人类发展的需要。

生态系统健康概念的突出特点是多学科交叉,这一概念提出的理论基础是生物学理论、系统科学理论、社会经济学理论、人类科学理论、健康学理论等。它的核心是评价生态系统健康程度、维持生态系统健康机理和落实科学管理措施。生态系统健康内含

着生态系统管理和环境管理的新方法，也是生态系统管理和环境管理的新目标。

认识生态系统健康首先要认识生态学及其发展，要认识生态系统健康问题的直接原因和全球性的环境问题。

## 1. 生态系统生态学

### 1.1 生态学及其特点

“生态学” (Ecology) 一词源于希腊文 *oikos*，其意为“住所”或“栖息地”。从字面上讲，生态学是关于居住环境的科学。生态学建立在希腊—罗马时代开始的博物学传统之上，它在 19 世纪后期的“生物学—博物学调查”和“自然保护运动”中发展成一门科学，具有一种生命自然的哲学意味。20 世纪中叶，突现的环境问题，才使一般公众开始广泛接受和了解生态学。

博物，通晓众物之意也。

关于可以作为生态学养分的博物学是一个较为复杂的事物，人们可以追溯至古希腊的医学之父希波克拉底 (Hippocrates)、希腊哲学家亚里士多德 (Aristotle) 及他的门徒、被后人誉为植物学之父的哲学家西奥弗雷特斯 (Theophrastus) 以及 18 世纪以来以林奈 (Linnaeus)、布丰 (Buffon) 为代表的博物学和 19 世纪达尔文 (Darwin) 的进化生物学。但是生态学能够作为一门正式命名的具有它自己的研究队伍的自我意识的学科，基本上是 19 世纪最后 10 年的事。

“生态学”一词的起源，曾经被弄错，它不应该归功于科学家海克尔 (Haeckel)，而应该归功于美国“田园牧歌派”博物学家、诗人和哲学家亨利·大卫·梭罗 (Henry David Thoreau)。德国博物学家 Haeckel 的一个突出贡献是于 1866 将生态学作为一个学科名词在其所著的《普通生物形态学》 (Generelle Morphologie der Organismen) 一书中表达，并认为生态学是研究生物在其生活过程中与环境的关系，尤指动物与其他动、植物之间的互惠或敌对关系。随后，“生态学”这个词开始被接受，并渐渐地成为研究环境问题和生物有机体之间关系和指导动植物学研究的一个规范：

生态学是研究生物与其生存环境之间相互关系的一门学科。它既不是孤立地研究生物有机体，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。如果把生物看成是一个生命系统，把环境看成是一个环境系统，又可以说，生态学就是研究生命系统与环境系统之间相互作用的规律及其机理的一门学科。总而言之，生态学是“关系学”。

自然界的各种生物物质结合在一起形成复杂程度相异的不同有机体组织水平，其从简单到复杂可分为：基因、细胞、器官、个体、种群、群落，每个层次和自然环境的相

互关联产生了具有不同特征的功能系统：基因系统、细胞系统、器官系统、个体系统、种群系统、生态系统。生态学研究的是个体以上的系统层次，即有机体组织层系谱中个体系统右侧的部分（图 1-1）。

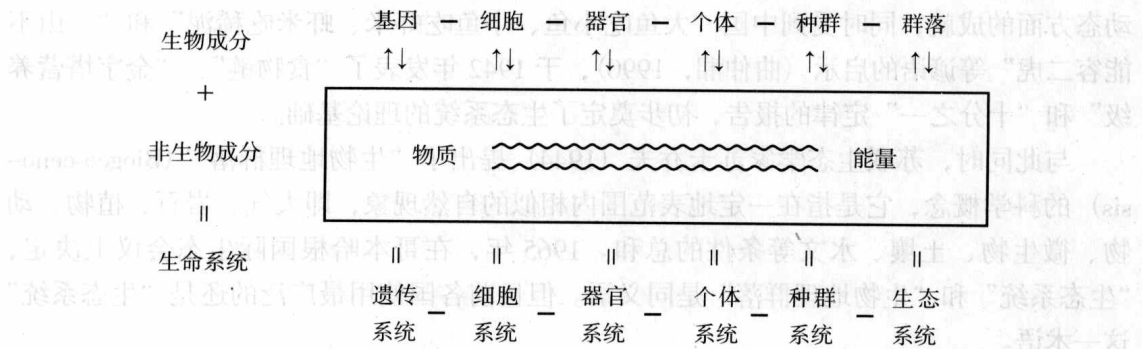


图 1-1 有机体组织层系谱

生态集中在谱的右侧，即有机体到生态系统的组织水平（Odum, 1971）。

① 生态学作为与生理学和形态学并列的生物学三个分支之一，相比较更能表现“生命自然的哲学”。

② 生态学是一门与人们所熟悉的建立在经典物理学之上的科学模式不同的学科。

③ 由于巨大可变性和复杂性，生态学总以多种多样的形式出现或存在。它研究的现象，经常紧密触及到人类感知能力的本质，如美学、道德、伦理学，甚至还触及到经济学。而由哲学家和物理学家倡导的关于科学的传统标准，一直难以应用于生态学现象。因此，要发展一种理论体系以解释它声称要解释的各种纷杂的现象一直是生态学的最大困惑。

④ 生态学从一开始就似乎注定与 20 世纪蓬勃发展的主流科学（基于数理化传统）的线性发展不太和谐。博物学传统一直主导着生态学家和生态学思想的发展。生态学继承了博物学的传统和自然思潮，是一种统一和综合的基础，也为生态系统健康学的出现提供了现代意义的博物学基础！

## 1.2 什么是生态系统

19 世纪 60 年代，全球环境危机出现，生态学开始置身于公众舞台，被广泛推崇为能够对人类和其他生物及其环境之间的关系给予恰当指导的科学。同时，生态学打破动、植物的界限，进入生态系统时期，并超越生物学的领域，其研究范围越来越广泛。在一些生态学著作中，对生态学采用了新的定义。美国生态学家 Odum (1956)，认为生态学是“生态系统结构和功能的科学”，在其后来的《生态学》（1997）一书中提出，生态学是“综合研究有机体、物理环境与人类社会的科学”，并以“科学与社会的桥梁”作为该书的副标题，以强调人类在生态学过程中的作用。但是生态学家对自己所要研究的对象的纷杂程度难以把握，各自局限于自己的研究领域，创造的许多词汇都具有同样的意思，

但是名称不一。生态系统 (Ecosystem) 概念的出现才将生态学家们团结起来。

生态系统是英国植物生态学家 Tansley (1935) 在讨论植物群落及其演替的“超级有机体”这一概念过程时引入的<sup>①</sup>。自 Tansley 提出生态系统学说后, 美国耶鲁大学青年生态学家 Lindeman 吸取了 Elton、Clements、Shelford 等早期生态学家关于生态系统营养—动态方面的成就, 同时受到中国“大鱼吃小鱼、小鱼吃虾米、虾米吃稀泥”和“一山不能容二虎”等谚语的启示 (曲仲湘, 1990), 于 1942 年发表了“食物链”、“金字塔营养级”和“十分之一”定律的报告, 初步奠定了生态系统的理论基础。

与此同时, 苏联生态学家苏卡乔夫 (1944) 提出了“生物地理群落” (Biogeocenosis) 的科学概念, 它是指在一定地表范围内相似的自然现象, 即大气、岩石、植物、动物、微生物、土壤、水文等条件的总和。1965 年, 在哥本哈根国际生态会议上决定, “生态系统”和“生物地理群落”是同义语。但目前各国使用最广泛的还是“生态系统”这一术语。

进入 20 世纪 50 年代, 特别是 60 年代以后, 著名生态学家 Odum、Whittaker 和苏联的生态学家苏卡乔夫和德利斯 (Н. В. Дѣлис) 等人的研究工作, 使生态系统学说的理论体系进一步完善, 进入了一个新的时期。20 世纪 70 年代以来, 生态系统学说得到了空前发展, 数学模型、控制论及电子计算机等理论和方法广泛应用到生态系统研究中, 由一般的定性描述逐渐走向定量的预测预报阶段。生态学期刊 (Journal of Ecology) 曾在一期评论中指出“生态系统已经成为 20 世纪 70 年代的一袋未雕琢的金刚石”, 高度评价生态系统未来的无限发展前途。目前对生态系统有着约定俗成的定义:

生态系统是生物与环境的综合体, 可以概括为: 自然界一定空间的生物与环境之间相互作用、相互制约、不断演变, 达到动态平衡、相对稳定的统一整体, 是具有一定结构和功能的单位。这就是说, 生态系统是自然界的基本单位, 这个基本单位是由生物及其周围的环境组成的, 在生物与环境之间相互作用、相互影响、相互制约, 不断地进行着物质与能量的交换, 并在一定的时期内处于动态平衡状态。

生态系统概念所表达的范围和大小没有严格的限制, 小至动物有机体内消化道中的微生物系统, 大至森林、荒漠等生物群落型, 甚至整个地球上的生物圈或生态圈, 其范围和边界是随着研究对象的特征而定的。因此, 生态系统的空间尺度和时间尺度往往相差很大。

生态系统主要是功能上的单位, 而不是生物学中分类学的单位。可以这样理解, 生态系统是指一个最大空间尺度上能自我维持的实体。这个实体的大小可以从几个厘米到几千公里。因此, 生态系统用来指层次上的最大空间尺度的实体。层次尺度概念可以从器官—物种个体—种群或群落—景观等来延伸。

<sup>①</sup> “超级有机体”概念是由 Clements 于 1905 年前后提出的。

1.2.1 生态系统的结构

生态系统结构主要指系统中具有完整功能的自然组成部分，具体表现为系统中的各生物在非生物环境中的配置、空间结构和时间结构。生物根据其利用养分和能量的生存方式不同可以分为生产者、消费者和分解者三个组分。

生态系统是一个具有特定功能的有机整体，它由生物群落和无机环境两大部分组成，生物群落包括生产者（自养有机体）、消费者（异养有机体）、分解者（还原者）（图 1-2）。在生态系统的各个部分之间不断地进行着物质与能量的交换，并在一定的条件下保持着相对的平衡。

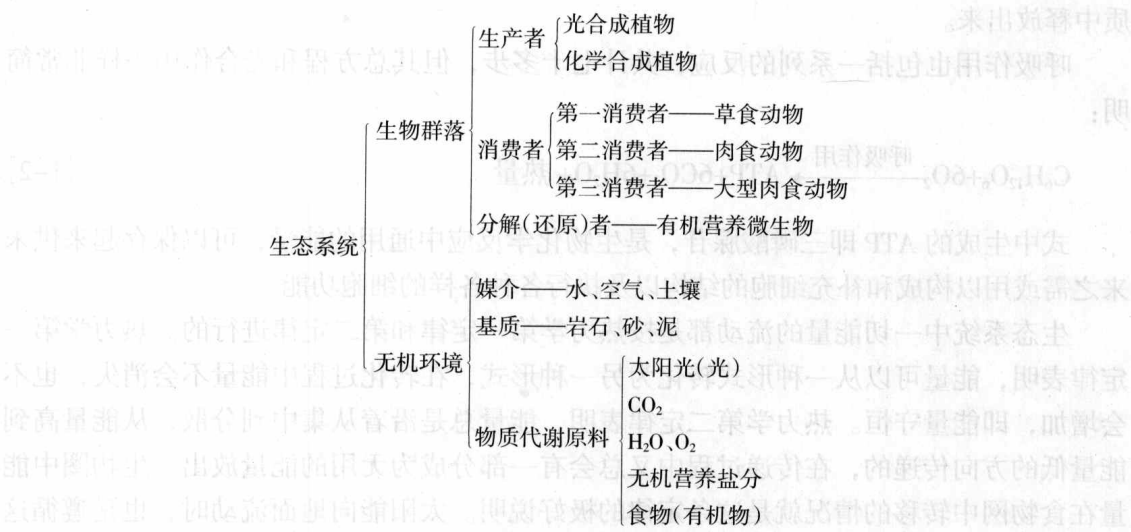


图 1-2 生态系统的结构 (郝志功, 1988)

陆地生态系统具有鲜明的空间结构。生物群落在空间上有明显的垂直和水平分布，即具有三维空间结构和二维水平结构。生态系统具有开放性（物质循环和能量流动）、运动性（相对稳定状态）、自我调节性（适应外界变化条件，维持系统动态平衡）、相关性（彼此相互联系）、演化性（产生、发展、消亡的周期性）等特征。

1.2.2 生态系统的功能

生态系统功能主要是指与能量流动和物质迁移相关的整个生态系统动力学。任何生态系统都存在着不断地进行着能量流动和物质循环，二者紧密联系形成了一个整体，成为生态系统的动力。此外，还存在着信息传递。能量流动、物质循环和信息传递是生态系统的三大基本功能。

1) 能量流动

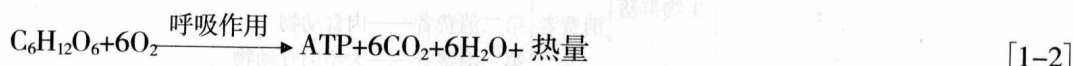
从能量观点看，地球是一个开放系统，即存在着能量输入与输出的系统。为了生物的生存，地球必须不断地接受太阳能输入并把热量输出到外层空间。因为一切生物（包括人类在内）所消耗的能量，除了极少部分的原子能外，最终来源于太阳能，食物是通过光合作用新近储存的太阳能，而化石燃料则是过去地质年代中光合作用储存的太阳能。

光合作用是生物吸收太阳能的唯一有效途径，它能把从太阳光获得的能量储存在食物分子中。光合作用的全过程虽然很复杂，需要一百多步反应才能完成，但是其总反应式却非常简明：



植物通过光合作用能够制造第一性食物分子，因此植物被称为“自养生物”。其他生物则依靠自养生物取得其生存所必需的食物分子，这些生物称为“异养生物”，它们是绿色植物的消费者，没有任何办法固定太阳能，因此只能直接（如食草动物）或间接（如食肉动物）从植物中获取富能的化学物质，然后通过“呼吸作用”把能量从这些化学物质中释放出来。

呼吸作用也包括一系列的反应，共计七十多步，但其总方程和光合作用一样非常简明：



式中生成的 ATP 即三磷酸腺苷，是生物化学反应中通用的能量，可以保存起来供未来之需或用以构成和补充细胞的结构以及执行各种各样的细胞功能。

生态系统中一切能量的流动都是按热力学第一定律和第二定律进行的。热力学第一定律表明，能量可以从一种形式转化为另一种形式，在转化过程中能量不会消失，也不会增加，即能量守恒。热力学第二定律表明，能量总是沿着从集中到分散，从能量高到能量低的方向传递的，在传递过程中又总会有一部分成为无用的能量放出。生物圈中能量在食物网中转移的情况就是这条定律的极好说明。太阳能向地面流动时，也是遵循这些规律进行的。据测定，进入大气层的太阳能是每分钟每平方米 8.368J。其中约 30% 被反射回去，20% 被大气吸收，只有 46% 左右到达地面。实际只有 10% 左右辐射到绿色植物上，而其中又有大部分被植物叶面反射回去，真正被绿色植物利用的只有其中的 1% 左右。绿色植物利用这一部分阳光进行光合作用制造的干有机物质，每年可达  $1.5 \sim 2.0 \times 10^{15} \text{ t}$ ，这是绿色植物提供给消费者的有机物产量。绿色植物通过光合作用把太阳能（光能）转化成化学能储存在这些有机物质中，提供给消费者需要。能量再通过食物链首先转移给草食性动物，再转移给肉食性动物。动物死后的尸体被分解者分解，把复杂的有机物转变为简单的无机物，在分解过程中把有机物储存的能量释放到环境中去。同时，生产者、消费者和分解者的呼吸作用，又都要消耗一部分能量，被消耗的能量也释放到环境中去。这就是能量在生态系统中的流动。

当能量在食物网中流动时，某一级中所储存的能量大约只有 10% 能够被其上一营养级的生物所利用，由此可见，其转移效率是很低的。其余大部分能量消耗在该营养级生物的呼吸作用上，以热量的形式释放到大气中去，这就是生态学上所谓的 10% 定律（或称十分之一定律）。

在上述热力学定律的约束下，自然界中大大小小的生态系统处于完美与和谐之中。例如，美国亚利桑那州的天然植被同凯白勃鹿及其天敌狼、美洲豹和山狗长期以来处于动态平衡状态之中，构成一个完善的生态金字塔；北欧的森林、麋与野狼也是这样的金

字塔。如果不是后来人类的干预,这些生态金字塔本来还会继续存在。

自然界的生存竞争(包括种间和种内的竞争)使生态系统更趋完美。种间竞争使一物种中的弱病者先被消灭(如病弱的羊最先被狼捕杀),而健壮者才得以生存;种内竞争(如雄兽之间的争斗)使一物种中的佼佼者得以遗传后代,保证了该物种品质的改良。

大自然赋予大地景色的多样性同样使生态系统更趋和谐。在这种多样性中,每种生物都会找到适宜的栖息地;当某种疾病或虫害袭来时,并非所有的物种都遭到毁灭,因而使生态系统在病虫害之后得以复苏。不幸的是,自然界中的平衡虽然很精巧,但很脆弱,容易遭到外力的破坏。人类虽然无力改变生态系统中的热力学定律,却往往轻易地破坏了生态系统中的生态金字塔与自然界的多样性,使地球上不少区域陷入“生态危机”之中。

## 2) 物质循环

维持生命除了需要能量外,还需要物质。能量和物质紧密相连,不能分开。目前地壳中的 90 多种元素几乎都是机体组织、器官和细胞的成分。这些元素的含量和作用都不相同,有的是营养元素,有的在机体的生理、生化过程中起特定的作用,还有一些元素是在外界特定环境条件下偶然进入机体的。随着科学技术的发展,发现对有机体生命必需的元素逐渐增多。现在,认为对有机体生命必需的元素有 24 种,包括碳、氧、氮、氢、钙、硫、磷、钠、钾、氯、镁、铁、碘、铜、锰、锌、钴、铬、锡、钼、氟、硅、硒、钒,可能还有镍、溴、铝和硼。但是,生态学家一直认为生物圈仅是氢、碳、氧和氮 4 种元素相互作用的场所。这 4 种元素构成动物、植物的 99% 以上,在生命中起着最关键的化学作用,被称为“关键元素”或“能量元素”。除此之外,其他的元素分为两类:一类是大量元素,另一类是微量元素。目前,人类对微量元素越来越重视,认为微量元素虽然很少,但其作用与任何大量元素一样,一旦缺乏,动植物就不能正常生长。当然,微量元素过多对动植物也会产生危害。

这里简要介绍生物圈中最重要的碳循环和氮循环。

### (1) 碳循环

碳是构成生物体的基本元素,约占生命物质总量的 25%。在无机环境中,碳是以二氧化碳和碳酸盐的形式存在的。生态系统中碳循环的基本形式是大气中的  $\text{CO}_2$  首先通过生产者的光合作用进入生物圈,然后通过消费者、分解者再回到大气中去,一小部分形成化石燃料储存在地层中。具体地讲,就是植物通过光合作用把大气中的  $\text{CO}_2$  生成碳水化合物,其中一部分作为能量供应为植物所消耗,而植物呼吸或发酵过程中产生的  $\text{CO}_2$  通过植物叶片和根部释放回大气中,然后再被植物利用,这是碳循环的最简单形式。

碳水化合物一部分被植物消耗,另一部分则被动物消耗,由食物氧化而产生的  $\text{CO}_2$  又通过动物呼吸释放回大气中。动植物死亡后,经过微生物分解作用产生的  $\text{CO}_2$  再释放回大气中,然后再被植物利用,这是碳循环的第二种形式。

生物残体埋藏在地层中,经过漫长的地质作用形成煤、石油、天然气等化石燃料。它们通过燃烧和火山活动释放出大量  $\text{CO}_2$ ,再被植物利用,然后重新进入生态系统的碳循环中,这是碳循环的第三种形式。

上述碳循环的三种形式是同时进行的。在生态系统中,碳循环的速度很快,最快的