

现代生态学讲座（二） 基础研究与环境问题

Lectures in Modern Ecology (II)
From Basic Science to Environmental Issues

郭建国 韩兴国 黄建辉 主编



中国科学技术出版社

现代生态学讲座 (二) 基础研究与环境问题

Lectures in Modern Ecology (II)
From Basic Science to Environmental Issues

邬建国 韩兴国 黄建辉 主编

中国科学技术出版社

·北 京·

图书在版编目 (CIP) 数据

现代生态学讲座 (二): 基础研究与环境问题/邬建国, 韩兴国, 黄建辉主编.
—北京: 中国科学技术出版社, 2002. 3
ISBN 7-5046-3061-6

I. 基… II. ①邬…②韩…③黄… III. 生态学—文集 IV. Q14-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 016250 号

中国科学技术出版社出版

北京海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码: 100081

电话: 62179148 62173865

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京印刷学院实习工厂印刷

开本: 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张: 15 字数: 396 千字

2002 年 3 月第 1 版 2002 年 3 月第 1 次印刷

印数: 1~300 册 定价: 38.00 元

(凡购买本社的图书, 如有缺页、倒页、
脱页者, 本社发行部负责调换)

本专著得到以下课题资助

- 国家自然科学基金杰出青年基金 (B 类) ——
“锡林郭勒草原景观格局与生态系统功能的
综合研究” (批准号 30028002)
- 国家重点基础研究发展规划 “973” 项目
—— “草地与农牧交错带生态系统重建机理
及优化生态 - 生产范式” (G2000018603)
- 中国科学院知识创新工程重大项目 ——
“浑善达克沙地与京北农牧交错区生态环境
综合治理试验示范研究” (KSCX1 - 08)

编辑委员会名单

主编 郭建国 韩兴国 黄建辉

编委(按拼音顺序排列)

白永飞 董 全 高 方 李凌浩

潘愉德 齐 晔 于砚民

责任编辑：杨 艳

封面设计：王川宇

责任印制：安利平

前 言

生态学是研究不同时空尺度上生物与环境之间相互关系的科学。自然界生物种类繁多，环境千变万化，生态科学可谓对象广泛，内容庞杂，囊括生物圈内千姿百态的格局与过程，横跨微观至宏观时空尺度，数、理、化、天、地、生各科以及经济、政治、管理与规划等社会科学诸领域都可以在生态学研究 and 应用中起重要作用。随着世界人口的迅速增加，环境日益恶化，生态学确实已经成为名副其实的有关人类生存的科学。

作为一个使命重大、但尚未成熟的学科，生态学在理论和实践诸方面发展迅速，日新月异。因此，若要保持与生态学发展的前沿同步，就必须了解其进程，把握其动向。要实现这一目标，及时地、准确地、周期性地将国内外生态学进展加以综合并广泛交流无疑是一个极为有效的途径。正因为如此，我国著名的生态学家李博院士于1994年9月4~12日在内蒙古自治区呼和浩特市首次筹备和主持了“现代生态学讲座暨学术研讨会”。这也许是第一个完全由中国人（包括在海外工作的）主讲的，但又是名副其实的“国际”生态学研讨会。并非偶然，这次由国家自然科学基金委员会资助的盛会取得了极大的成功。基于这一研讨会的内容，1995年由李博院士主编的《现代生态学讲座（一）》一书出版发行。据悉，该书一售而空，至今在我国生态学同行中广为流传。

1998年5月，李博院士在一次国际生态学会议期间不幸罹难。他的去世无疑是中国生态学界的一大损失。为了纪念这位为中国生态学作出了杰出贡献的著名学者，在中国环境科学院倡议和国家自然科学基金委员会的资助下，“第二届现代生态学研讨会”于1999年6月15~19日在北京召开。于砚民、黄建辉和韩兴国为筹备和组织这次研讨会做了大量工作。在这次聚会上，来自国内外的几十位生态学者缅怀了李博院士对中国生态学作出的丰功伟绩，并对世界生态学中的一系列理论和应用问题进行了交流和讨论。为了弘扬李博院士创导的“讲座”传统，并作为对李先生的永久纪念，参加讲座的代表欣然聚首并商定出版《现代生态学讲座（二）：基础研究与环境问题》一书。

为了保证该书的广度、深度和整体水平，在编辑过程中，我们特邀了数位在国内外学有所成见的生态学者为本书撰稿。连同从第二次“讲座”中选录的论文，本书共包括18篇文章。就其内容而言，该书涉猎广泛，理论和实践相结合。书中讨论了生态学中的一系列理论问题，如复杂性概念和理论以及生理、种群、群落和生态系统生态学的一些核心概念和研究热点，并介绍了一些新的生态学方法，如人工神经网络、整合分析和空间分析等方法。此外，本书还突

出了一些应用生态学学科的最新进展和实际范例，如恢复生态学、景观经营、城市生态学、全球变化，以及空气污染和环境决策。

最后，我们在此向“第二届现代生态学研讨会”的筹办者、赞助者和全体与会者，尤其是本书的所有撰稿者，表示衷心感谢。此外，我们还感谢以下诸位特邀审稿人：唐艳鸿、何芳良、武昕原、王全禄、郭勤峰、缪世利、申卫军。董鸣博士提供了封面照片。

谨以本书献给我国著名生态学家李博院士。

邬建国 韩兴国 黄建辉

2001年11月

目 录

著名植物生态学家李博院士生平	杨持 杨劼 (1)
复杂性科学及其生态学应用	邬建国 申卫军 (6)
物种分布和丰度的关系	何芳良 (16)
物种在生态系统功能过程中的作用	黄建辉 韩兴国 马克平 (26)
种内相食行为的一项理论	董全 Gary A. Polis (40)
人工神经网络在森林资源管理中的应用	彭长辉 林辉 (53)
空间异质性及其研究方法	刘先华 (68)
整合分析法——生态与进化生物学中数据综合分析的新方法	方炜 (83)
木本植物对水分胁迫的生理生态反应——木质部空穴与栓塞化	申卫军 张硕新 (95)
林下光斑及有关植物生理生态研究	曹坤芳 (110)
大气二氧化碳浓度升高与其他环境因素对植物结构与功能的交互影响	
.....	缪世利 骆亦其 刘玉成 惠大丰 (121)
恢复生态学	任海 彭少麟 邬建国 (144)
美国佛罗里达 Everglades 湿地植被取代与恢复的生态学研究	缪世利 (159)
景观经营中的几点生态学顾虑	陈吉泉 (178)
中国主要农业生态过渡带的变迁及其景观生态意义 (I): 农牧交错带	侯向阳 (191)
中国主要农业生态过渡带的变迁及其景观生态意义 (II): 温带-亚热带过渡带	
.....	侯向阳 (197)
全球变化研究中的生物圈模型 (II): 呼吸与分解	齐晔 唐剑武 徐明 (205)
地面臭氧与生态系统: 美国的科研与决策动向	高方 (213)
城市生态学: 一个面临新挑战的生态学领域	朱伟兴 邬建国 张利权 (220)

CONTENTS

About Prof. Li Bo	Yang Chi, Yangjie (1)
The Sciences of Complexity and Ecological Applications	Wu Jianguo, Shen Weijun (6)
Species Abundance-Distribution Relationship	He Fangliang (16)
Roles of Species in Ecosystem Functions	Huang Jianhui, Han Xingguo, Ma Keping (26)
A Theory of Cannibalistic Foraging	Dong Quan, G. A. Polis (40)
Artificial Neural Networks and Their Applications in Forest Resource Management	Peng Changhui, Lin Hui (53)
Spatial Heterogeneity and Ecological Analysis	Liu Xianhua (68)
Meta-analysis: An Emerging Quantitative Synthesis Technique in Ecology and Evolution	Fang Wei (83)
Ecophysiological Response of Woody Plants to Water Stress: Xylem Cavitation and Embolization	Shen Weijun, Zhang Shuoxin (95)
Sunflecks and Related Ecophysiological Research	Cao kunfang (110)
Interactive Effects of Atmospheric CO ₂ Enrichment and Other Environmental Stresses on the Structure and Function of Plants	Miao Shili, Luo Yiqi, Liu Yucheng, Hui Dafeng (121)
Restoration Ecology	Ren Hai, Peng Shaolin, Wu Jianguo (144)
Ecological Studies on the Replacement and Restoration of Wetland Vegetation in the Florida Everglades, USA	Miao Shili (159)
Several Ecological Issues in Landscape Management	Chen Jiquan (178)
Historical Changes of Main Agricultural Ecotones of China and Their Agricultural Landscape Ecological Importance (I): Agriculture-grassland Ecotone of North China	Hou Xiangyang (191)
Historical Changes of Main Agricultural Ecotones of China and Their Agricultural Landscape Ecological Importance (II): Temperate-Subtropical Ecotone	Hou Xiangyang (197)
Biospheric Models in Global Change Research (II): Respiration and Decomposition	Qi Ye, Tang Jianwu, Xu Ming (205)
Ground-Level Ozone and Ecosystems: Directions in Research and Policy in the U. S.	Gao Fang (213)
Urban Ecology: An Ecological Field Facing New Challenges	Zhu Weixin, Wu Jianguo, Zhang Liquan (220)

著名植物生态学家 李博院士生平

杨 持 杨 劼

(内蒙古大学生命科学学院生态与环境科学系, 呼和浩特市, 010021)

李博先生 1953 年毕业于北京农业大学农学系, 分配到北京大学, 任著名植物学家、植物生态学家李继侗教授的研究助教。1959 年随李继侗教授支援边疆来到内蒙古大学。从 50 年代起, 一直从事干旱、半干旱地区植被及草地生态学的教学、科研工作, 在这一时期, 对我国草原地区及沙漠地区植被的基本类型与分布规律, 对草原植被生产力与蒸腾、降水的关系做了充分阐述, 完成了内蒙古草原的大面积调查及植被图的绘制, 填补了内蒙古草原研究的空白; 80 年代以后的成果明显地反映出李博先生学术思想的飞跃, 紧跟国际科学前沿, 率先应用遥感、GIS 等现代科学技术, 对内蒙古自治区 118 万平方公里的草地资源进行调查与评价; 90 年代, 利用遥感信息与 GIS 技术系统, 使我国草地信息管理进入国际现代化管理的行列。

李博先生一直兢兢业业地耕耘在科研、教学第一线 40 多年之久。1977 年他率先建成我国高校中第一个生态学专业; 1981 年建立植物学硕士点 (含植物生态学方向); 1990 年建立博士点, 使内蒙古大学成为我国生态学人才培养的重要基地之一。

李博先生先后任讲师、副教授 (1978)、教授 (1983)、硕士生导师 (1978)、博士生导师 (1990)。1993 年当选为中国科学院生物学部院士。行政上先后任内蒙古大学生物系植物生态学教研室主任、生物学系主任、内蒙古大学自然资源研究所所长、内蒙古大学生命科学学院名誉院长。1988~1995 年任中国农业科学院草原研究所所长, 1993 年任农业部草地资源生态重点开放实验室主任。主要的社会兼职有: 内蒙古自治区科学技术顾问委员会委员、内蒙古自治区科协第三届名誉主席、中国科学院出版基金专家委员会生命科学专业组成员、北京大学遥感应应用研究所兼职教授、北京师范大学国家教委环境演变与自然灾害开放研究实验室第二届学术委员会主任、中国生态学会副理事长、中国草原学会副理事长、中国自然资源学会副理事长、内蒙古生态学会理事长、中国植被图编委会副主编、《中国草地》主编、《生态学报》副主编、《遥感学报》副主编、《植物生态学报》常务编委。

李博先生生前是内蒙古自治区第五届、第八届人民代表大会代表, 第九届全国人民代表大会代表。1986 年被评为内蒙古自治区特等劳动模范, 1990 年被国家教委、国家科委评为全国高校先进科技工作者, 1990 年被评为中国农业科学院先进工作者, 1991 年享受中华人民共和国国务院政府特殊津贴。

李博先生从 1980~1998 年先后 21 次出访美国、法国、日本、俄罗斯、比利时、阿根廷、新西兰、澳大利亚、印度、匈牙利等 10 个国家进行学术交流活动, 其中 1980 年 10 月~1981 年 7 月, 应美国爱达荷大学邀请, 赴美进行了学术访问, 并考察了北美草原, 考察了美国 21 个州, 行程 8000 多公里; 1983 年 10 月~11 月受国家教育部委托率中国生态学教

育考察团（任团长）访问比利时和法国；1995年9月赴俄罗斯圣彼得堡出席亚洲植被图工作会议，任中国代表团副团长，在会议上做了《内蒙古植被图及其应用》的报告，参观访问自然保护区、大学、研究所等并建立了学术交流联系；1996年8月作为特邀代表赴美国波罗斯顿出席美国生态学会（ESA）年会“关于亚洲今天及未来的生态与环境问题”专题会议，并在大会上做《欧亚大陆草地生态研究的新进展》的特邀报告。

李博作为组织者之一，成功地主办了三次国际学术会议：1987年8月，内蒙古大学与中国“人与生物圈”国家委员会、中国科学院植物研究所联合发起并主持召开“国际草地植被会议（IGVC）”，任组织委员会副主席；1993年8月，中国农业科学院草原研究所与中国草原学会、农业部畜牧兽医司联合发起并主持召开“国际草地资源会议（ISGR）”，任大会秘书长；1994年9月，发起并组织了“现代生态学讲座暨学术研讨会”。1997年8月，为庆祝内蒙古自治区成立50周年、内蒙古大学建校40周年，与中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站联合发起并主持召开“蒙古高原草地管理国际学术会议（ISGM）”，任组织委员会主席。

李博先生先后主持国家科技攻关课题3项、专题4项、省部级课题多项。发表学术论文154篇，主编和参编学术专著22部，译著7部。先后获全国科学大会表彰奖；“六五”国家科技攻关表彰奖；国家自然科学二等奖；国家科技进步二等奖、三等奖各一项；省部级科技进步一等奖4项、二等奖2项、三等奖2项；内蒙古自治区第二届乌兰夫奖金基础科学特别奖等。

李博院士于1994年9月成功地主办了全国第一次现代生态学讲座，邀请在国外学有成就的博士、博士后回国演讲，既给这些海外学子提供一个为祖国做贡献的机会，又使国内的青年生态学工作者更快、更直接地了解国际生态学发展动态。会后由科学出版社出版了《现代生态学讲座（一）》一书，深受广大生态学工作者的欢迎。在经历了李博先生不幸罹难的悲痛之后，1999年5月由中国环境科学研究所举办了第二次全国现代生态学讲座，以此来纪念这位故去的著名生态学家，我们作为先生的学生并在先生身边工作多年，深感意义深远，正如吴征镒院士在给《李博文集》所作的“序”中写到：“李博院士一生对科学与教育事业的贡献是卓著的，为了继往开来，应该把他一生的论著汇集起来，作为一项宝贵的科学财富为后人所用”。我们召开纪念会，再次出版《现代生态学讲座（二）：基础研究与环境问题》，也都是为了这个目的。李博先生留下最宝贵的财富不只是对草地生态学研究的卓越贡献和人才培养，更是他那为科学献身的精神。

李博院士一生中共发表了183篇（部）学术论文和著作（包括译著7部）。下面是从《李博文集》目录中摘选的52篇，反映了李博院士近40年在干旱、半干旱区植被生态学方面的学术成果。

1. 内蒙古大学生物系治沙小组. 内蒙古荒漠区植被考察初报. 内蒙古大学学报, 1960, No. 1
2. 李博. 地植物学的产生、发展和展望. 内蒙古大学首届科学讨论会上报告, 1961
3. 于守忠, 李博, 蔡蔚祺, 等. 内蒙古西部戈壁及巴丹吉林沙漠考察. 治沙研究 (第3号), 北京: 科学出版社, 1962
4. 李博, 周万福, 李文生. 内蒙古库布齐沙漠考察. 治沙研究 (第3号), 北京: 科学出版社, 1962

5. 李博, 等. 中国西北和内蒙古沙漠地区的植被及其改造利用的初步意见. 治沙研究 (第4号), 北京: 科学出版社, 1962
6. 李博. 内蒙古地带性植被的基本类型及其生态地理规律. 内蒙古大学学报, 1962. No. 1
7. 李博. 试论草原生产力与蒸腾耗水量的关系. 全国畜牧学学术讨论会大会报告, 1963
8. 李博. 内蒙古植被研究史. 内蒙古大学学报, 1964, No. 1
9. 李博, 雍世鹏, 刘钟龄. 对开展内蒙古植被研究工作的一些意见. 内蒙古大学学报, 1964, No. 1
10. 李博, 曾泗弟, 郝广勇. 内蒙古呼伦贝尔盟草原区羊草、丛生禾草群落水分生态的初步研究. 植物生态学与地植物学丛刊, 1964, Vol. 2 No. 1
11. 杨宝珍, 李博, 曾泗弟. 关于草原群落研究中样方面积大小的初步探讨. 植物生态学与地植物学丛刊, 1964, Vol. 2 No. 1
12. 李博. 中国草原植被的一般特征. 中国草原, 1979, No. 1
13. 李博. 大兴安岭兴安落叶松林的基本特征. 内蒙古大学学报, 1980, Vol. 11 No. 1
14. 李博, 雍世鹏, 刘钟龄. 松辽平原的针茅草原及其生态地理规律. 植物学报, 1980, Vol. 22 No. 3
15. 李博. 从生态学观点谈草原的科学管理. 西北地区农业现代化学术讨论会论文选集 (第四卷), 1980
16. 李博, 孙鸿良, 曾泗弟, 等. 呼伦贝尔盟牧区草场植被资源及其利用方向的探讨. 自然资源, 1980, No. 4
17. 李博, 孙鸿良. 论草原生产潜力及其挖掘的途径. 中国农业科学, 1983, No. 3
18. 李博. 中国的几种植被类型 (II) 草原. 生物学通报, 1987, No. 5
19. 李博. 中国的几种植被类型 (III) 草原. 生物学通报, 1987, No. 6
20. 李博. 内蒙古草场资源调查研究回顾及当前任务. 内蒙古草场资源遥感应用研究 (第一卷), 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 1987
21. 李博, 曾泗弟. 呼伦贝尔盟生态区域的划分. 内蒙古草场资源遥感应用研究 (第一卷), 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 1987
22. 李博, 叶波. 兴安盟植被遥感考察报告. 内蒙古草场资源遥感应用研究 (第二卷), 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 1987
23. 李博, 雍世鹏, 曾泗弟等. 内蒙古草场资源遥感分析. 内蒙古草场资源遥感应用研究 (第三卷), 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 1987
24. 李博, 黄文惠, 马志广. 我国草地科学的成就与展望. 中国草地科学与草业发展, 北京: 科学出版社, 1989
25. 李博, 牛建明. 鄂尔多斯高原植被. 内蒙古鄂尔多斯高原的自然资源与环境研究, 北京: 科学出版社, 1990
26. 李博, 雍世鹏, 曾泗弟等. 生态分区的原则、方法与应用——内蒙古自治区生态分区图说明. 植物生态学与地植物学学报, 1990, Vol. 14 No. 1
27. 李博. 草地生态学. 现代生态学透视 (第三篇第十五章), 北京: 科学出版社.

1990

28. 李博. 我国草地生态研究的成就与展望. 生态学杂志, 1992, Vol. 11 No. 3
29. 李博, 史培军, 任志弼, 等. 中国北方草地畜牧业动态监测技术系统设计. 中国北方草地畜牧业动态监测研究(一), 北京: 中国农业科技出版社, 1993
30. 李博. 生态学与草地管理. 中国草地, 1994, No. 1
31. 李博. 我国草原生物多样性保护. 草地生物多样性保护研究, 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 1995
32. 李博. 鄂尔多斯高原的自然条件与草地资源概况. 鄂尔多斯高原沙质灌木草地绒山羊试验区研究成果汇编, 呼和浩特: 内蒙古教育出版社, 1995
33. 李博. 我国草地资源现况、问题及对策. 中国科学院院刊第1期, 1996
34. 李博. 中国北方草地退化及其防治对策. 中国农业科学. 1997, Vol. 30 No. 3
35. 张新时, 李博, 史培军. 南方草地资源开发利用对策研究. 自然资源学报, 1998, Vol. 13 No. 1
36. Li Bo. Outline of the Steppe Vegetation of China and Its Utilization; Remote Sensing for Grassland Types Survey and Mapping in Inner Mongolia, China. “第十四届国际草地会议”宣读. 美国肯塔基, 1981
37. Chen Kai, Li Bo. The Application of Remote Sensing Technology to the Resource Investigation of Inner Mongolia. 《第十五届国际草地学术会议论文集》. 日本, 京都, 1985
38. Chen Kai, Li Bo. Present Development in the Application of Remote Sensing to Grassland Resources Survey in China. 《国际草地植被会议论文集》. 北京: 科学出版社, 1990
39. Li Bo, Yong Shipeng, Zeng Sidi. Principles, Methods and Application of Ecological Regionalization of the Inner Mongolia Autonomous Region. 《国际草地植被会议论文集》, 1990
40. Poissonet J., Li Bo. Relationships Between Main Plant Communities and Ecological Variables in the Steppe Region of Inner Mongolia: Application of Factorial Correspondence Analysis to Existing Data. 《国际草地植被会议论文集》, 1990
41. Li Bo. The Steppe and Its Development in China. Regional Conference on Asian Pacific Countries International Geographical Union. 1990, Vol. 2
42. Li Bo, Yang Jie, Chen Kai. Remote Sensing Monitoring for Mao-Wu-Su Sandy Rangeland Dynamics in Inner Mongolia, China. 第四届国际草场会议论文. 法国. 蒙伯利讷, 1991
43. Li Bo, Shi Peijun, Lin Xiaoquan. A Research on the Dynamic Monitoring System for Forage Livestock Balance in the Temperature Grassland of China. 全球变化监测与制图会议论文. 美国华盛顿, 1992
44. Li Bo, Shi Peijun, Lin Xiaoquan. The Production Estimation by Remote Sensing and the Productivity Spatial Pattern of Grassland in Xilingol League of Inner Mongolia, China. 国际摄影测量与遥感协会第十七届年会上宣读. 美国华盛顿, 1992

45. Li Bo, Yong Shipeng. Winter Cold Temperate Grasslands: Identifying Problems. 第十七届国际草地会议特邀报告. 新西兰梅伯密斯顿, 1993
46. Li Bo, Shi Peijun, Chen Jin. Experiment on Dynamic Monitoring of Balance Between Forage-Livestock in Xilingole League of Inner Mongolia. 国际草地资源会议. 中国, 呼和浩特, 1993
47. Li Bo. A Brief Introduction to the Research in the Impacts of Climate Change on Grassland and Rangeland in China. 政府间气候变化专门委员会第二工作组第三小组工作会议上报告. 阿根廷, 戈罗泊兹镇, 1993
48. Li Bo. The Degenerated Rangeland Restoration and Sustainable Development in China. 亚太地区退化土地持续发展学术会议大会报告. 印度, 新德里, 1994
49. Li Bo, Niu Jianming, Yang Chi. Study on Rangeland Biodiversity in China. 第五届国际草场会议论文. 美国, 盐湖城, 1995
50. Li Bo. Recent Development in Grassland Ecology of Eurasia. 美国生态学会, 亚洲今天及未来的生态环境专题讨论会特邀报告. 美国, 波罗温斯顿, 1996
51. Li Bo, Vinczeffey. I. The Grassland Resources of China and Their Management Strategies. Ecological Aspects of Grassland Management. 第十七届国际欧洲草地管理学术会议报告, 匈牙利, 德布勒, 1998
52. Li Bo. The Monitoring System and Information Management of Grassland in China. 第十七届国际欧洲草地管理学术会议报告. 匈牙利, 德布勒森, 1998

复杂性科学及其生态学应用

邬建国¹ 申卫军²

(¹亚利桑那州立大学生命科学系, Phoenix, AZ 85069, USA

²中国科学院华南植物研究所, 广州, 510650)

摘要 本文简要地介绍复杂性科学在近年来的一些新进展, 着重讨论复杂适应系统理论和自组织临界理论的主要内容和特征, 以及它们在生态学研究中的应用前景。在此基础上, 作者讨论了自组织临界性-等级结构连续带假说, 认为大多数生态系统并非处于所谓的自组织临界态, 而是处于自组织临界性-等级结构连续带上更接近等级结构一端的区域。复杂性科学为生态学研究提供了新方法、新理论, 其应用和发展很可能是生态学在新世纪最富有挑战性和重要性的研究热点之一。

Abstract Wu J.¹, W. Shen² (¹ Arizona State University West, Phoenix, AZ 85069, USA; ²South China Institute of Botany, CAS, Guangzhou, 510650). The Sciences of Complexity and Ecological Applications. This paper discusses the problem of complexity and reviews some of the major developments in the sciences of complexity in recent years. It focuses on the main tenets and characteristics of the theory of complex adaptive systems and the theory of self-organized criticality. Based on these discussions, a self-organized criticality-hierarchy continuum hypothesis is proposed in which most ecological systems occur towards the hierarchy end. Furthermore, moving from the self-organized criticality end to the hierarchy end, spatial heterogeneity, component diversity, system stability, and the relative significance of external forces and constraints tend to increase. The application and development of the theory of complexity in the context of ecological and environmental issues may well be one of the most challenging and significant research foci for ecology in the new millennium.

与我曾想像的全然不同, 科学的进步并不只是依赖于细致的观察、精确的实验, 以及据此提炼出的理论。它始于观察者创造的一个抽象世界或其片断, 然后与基于现实世界的实验结果进行对照。正是这种想像与实验间的不断对话, 才使人们形成了对客观世界渐趋完美的理解。

——引自法国分子生物学家 Francois Jacob, 1998

一、前言

人类面临着环境、政治、经济、社会等各种各样的复杂性问题的挑战。纵观生物学、医学、数学、物理学、化学、工程学、经济学、政治学、哲学、社会学、决策科学、计算机科

学及人工智能等领域，科学家们正在探索这样的问题：是否存在任何普遍理论能够帮助我们理解种类繁多的复杂现象？复杂性科学（the sciences of complexity，简称复杂学，见 Cowan 等，1994；张知彬等，1998）是一门新兴的极度概括的综合性学科，其主要目的就是回答上述问题。复杂性科学专门研究复杂现象或复杂系统，以寻找一般性规律，因而涉及诸多学科。对于那些渴望理解和对付复杂现象的人们来说，复杂学可谓是理论基础所在，妙计锦囊之贮。这一新兴学科吸引了来自不同领域的杰出科学家对其理论框架和研究方法的探索，并正在形成各种各样有关复杂系统的新概念和新理论。

生态系统的组成单元数目多，且不尽相同，单元间常常存在强烈的非线性相互作用。生态系统中反馈与调节的方式多样且不断变化，系统组份与相关过程也往往表现出高度的时空异质性。一般而言，随着生物进化，群落演替过程趋于更加复杂化，并表现出对环境的适应性。以上几个特征使生态系统成为自然界最复杂的系统之一（O' Neill 等，1986；Wu 和 Loucks，1995；Wu，1999）。既然生态系统是复杂系统，那么我们自然会问：复杂性理论对生态学有何指导意义？生态复杂性研究对复杂性理论能做些什么贡献呢？本文将针对这些问题，就复杂性科学的一些新进展及其在生态学中的应用做一简要讨论。

二、复杂性及复杂性科学

1. 什么是复杂性

复杂系统通常具有大量组分，而且组分间存在非线性相互作用，从而使得系统能够表现出聚现特征（emergent properties）。所谓突现特性是指单凭研究组分不可能获得的系统的聚合特征，它是多组分非线性作用的结果，也是复杂系统“整体”大于所有组分之“总和”的根本原因。复杂性就是复杂系统的特征和属性。一个较全面的复杂性概念除了包含复杂系统

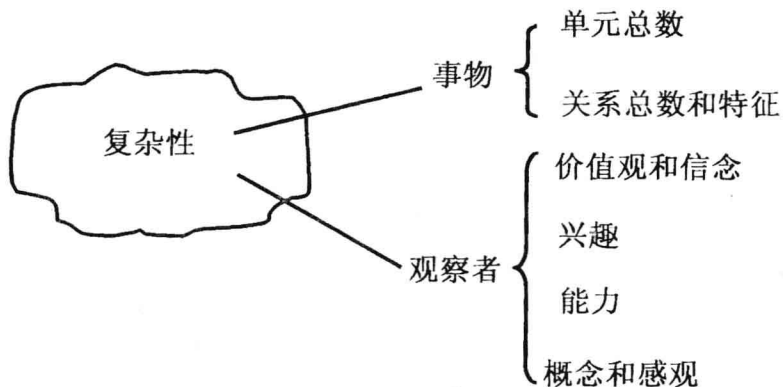


图1 系统复杂性的组分：组成单元数目的多寡，单元间相互作用关系，以及人为因素都可能导致系统的复杂性（引自 Flood，1987）

的固有属性外，还应包括观察者或研究者的特征（图1）。这是因为对客观系统复杂性的表述及其特征不可避免地受到研究者的兴趣、能力，以及学术观点和信仰的影响。尽管科学家追求客观真理，科学最终还是客观世界和一群有特殊爱好和追求的人们相互作用的结果。因此，认清科学家作为观察者在研究结果中的作用是十分重要的，这往往也是被忽略的一点。

Weaver (1948) 依据系统的组成结构特征把复杂性分为三类, 即有组织简单性 (organized simplicity)、有组织复杂性 (organized complexity) 和无组织复杂性 (disorganized complexity)。这与 Weinberg (1975) 提出的小数系统 (small-number systems)、中数系统 (middle-number systems) 和大数系统 (large-number systems) 相对应。小数系统的组分数量少, 相互作用方式简单, 常表现出有组织简单性, 因此可以用传统的数学分析方法来研究 (如牛顿力学)。大数系统中的组成成分数量庞大, 但各组分行为高度自由, 表现出随机性, 产生所谓的无组织复杂性。这类复杂性问题可用统计方法来有效处理 (如统计物理学)。然而大多数生态学与环境科学中所要处理的系统是中数系统, 它们表现出有组织复杂性 (Allen 和 Starr, 1982; O' Neill 等, 1986; Flood, 1987)。一方面, 用简单数学分析方法不能对付此类系统中的大量成分; 另一方面, 传统统计方法又不宜用来研究中数系统组分间的非线性相互作用。等级理论认为, 要处理此类复杂性, 要么是把中数系统转化为小数系统, 要么是发展出与简单数学分析和统计方法本质上不同的新方法 (Wu, 1999)。系统科学正是为了解决这种有组织复杂性而发展起来的 (Weinberg, 1975; Flood 和 Carson, 1993)。系统方法强调过程与动态, 在处理工程、社会、经济与生态系统中复杂的反馈与非线性相互作用时颇为有效, 但在需考虑空间异质性的情况时又有局限性。

据系统结构本身是否随时间而变和变化方式的差异, 还可以区分出静态复杂性 (static complexity)、动态复杂性 (dynamic complexity) 和自组织复杂性 (self-organizing complexity)。静态复杂性指一个系统的组成及其结构的多样性, 不直接涉及系统的功能和动态。动态复杂性强调系统的功能及时间格局, 但系统结构本身不因时间而变。自然界中的许多系统与其赖以存在的环境协同进化, 而且组分间的非线性相互作用导致系统的突现特性 (Nicolis 和 Prigogine, 1989; Levin, 1999)。这些聚现特征又可以引起系统结构及功能的变化, 产生所谓的自组织复杂性。这类复杂性是生物学家最感兴趣的, 也是目前复杂性科学的主要研究对象。需要指出的是, 尽管人们通常似乎把复杂性看作是复杂系统的属性, 简单的物理系统在发生相变或处于临界态时表现出突现和自组织特征, 其行为足可谓复杂。因此, 复杂性概念应注重于与系统行为复杂性有关的特征 (Nicolis 和 Prigogine, 1989)。

2. 复杂性科学

诺贝尔经济学奖得主, 等级理论的集大成者之一, Herbert A. Simon (1996) 把 20 世纪有关复杂性的研究分为三个阶段。第一阶段是第一次世界大战后, 以“整体论” (holism)、“完形论” (或格式塔, Gestalts)、“创世进化” (creative evolution) 等概念和术语为代表, 具有强烈反“还原论” (reductionism) 的色彩。第二个阶段出现在第二次世界大战后, 以“普通系统论” (general systems)、“信息论” (information)、“控制论” (cybernetics) 和“反馈” (feedback) 等理论和概念为特征, 主要强调反馈及平衡过程在维持系统稳定性方面的作用。现在的复杂性研究的兴趣则聚焦于复杂性的产生、维持机理以及研究方法诸方面。近 30 年来, 各种有关复杂性的观点和理论不断涌现, 如“等级理论”、“耗散结构” (dissipative structures)、“自组织临界理论” (theory of self-organized criticality)、“混沌” (chaos)、“灾变” (catastrophe)、“分形” (fractals)、“细胞自动机” (cellular automata) 和“遗传算法” (genetic algorithms) 等。这些理论或概念强调了复杂性研究的不同侧面, 也在一定程度上反映了当今复杂性科学的指导思想和研究手段。现在所说的复杂性科学可以认为是 Simon 所言