

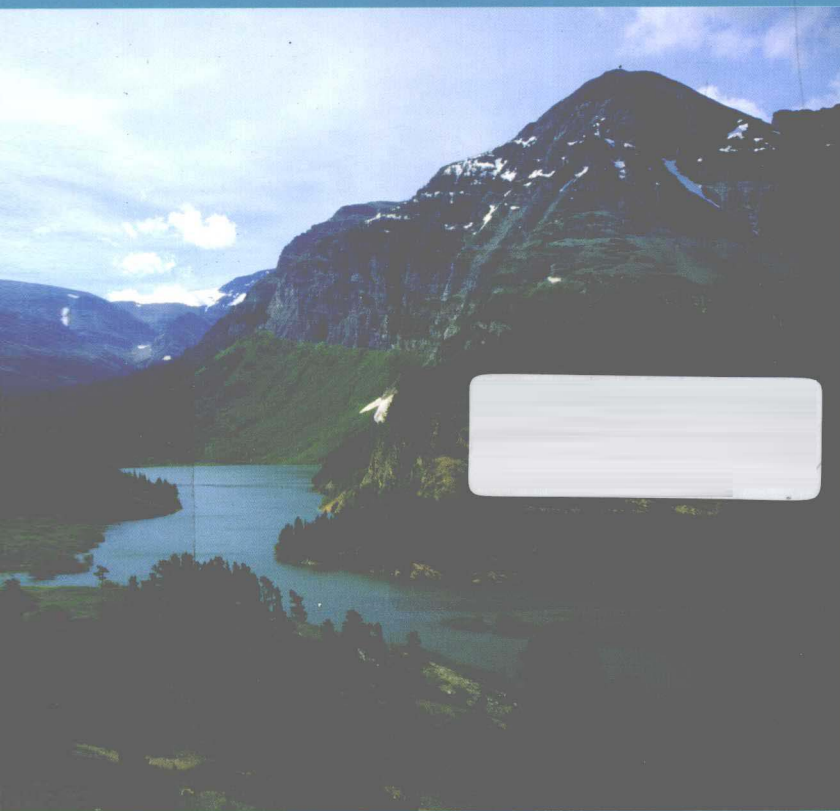
生 态 学 名 著 译 丛

Introduction to Systems Ecology

系统生态学导论

[丹] Sven Erik Jørgensen 著

陆健健 译



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

生态学名著译丛

Introduction to Systems Ecology

系统生态学导论

Xitong Shengtaixue Daolun

[丹] Sven Erik Jørgensen 著

陆健健 译



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

图字 : 01-2012-5682 号

© 2012 by Taylor and Francis Group, LLC

All Rights Reserved

Authorized translation from English language edition published by CRC Press,
part of Taylor & Francis Group LLC.

*Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are
unauthorized and illegal.*

图书在版编目 (CIP) 数据

系统生态学导论 / (丹) 约恩森著 ; 陆健健译 . --

-- 北京 : 高等教育出版社, 2013. 3

书名原文 : Introduction to systems ecology

ISBN 978-7-04-037079-9

I. ①系… II. ①约… ②陆… III. ①生态系生态学

IV. ①Q148

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 050220 号

策划编辑 陈正雄

责任编辑 陈正雄

封面设计 张楠

版式设计 马敬茹

责任校对 刘春萍

责任印制 赵义民

出版发行 高等教育出版社

社址 北京市西城区德外大街 4 号

邮政编码 100120

印刷 大厂益利印刷有限公司

开本 787mm × 1092mm 1/16

印张 17.75

字数 330 千字

购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

网上订购 <http://www.landaco.com>

<http://www.landaco.com.cn>

版次 2013 年 3 月第 1 版

印次 2013 年 3 月第 1 次印刷

定 价 49.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 37079-00

前 言

这是我所知道的第一本具备教科书性质的系统生态学书籍——涵盖图解、例证、练习、小结,并突出重点。原因是“系统生态学”(或“生态系统理论”)可从多个理论角度得到有效阐述,如热力学、层级结构、网络理论、生物化学或生态计量学;而要把这些理论角度整合一体颇具难度。我希望通过《系统生态学导论》一书做一个初步的有效尝试,也希企得到读者们的意见反馈;你们的建议将有可能对此书第二版的完善有帮助。若此书有疏漏之处、言语构架等可改进之处,请您通过电子邮件告知我,邮件地址为:msijapan@hotmail.com.

系统生态学在众多生态学学科中得到越来越广泛地应用。我们把它应用于生态建模,因为如果不了解某一个系统的属性及反应特征,便无法构建该系统的模型。我们把它用于生态工程,因为如果不了解某一个系统,就不可能建造出该系统。我们把它用于筛选生态指标,因为对生态系统健康评估最佳生态指标的筛选无疑需要我们了解该系统及其属性和可能存在的问题。我们在生态和环境管理中也广泛地应用系统生态学,因为生态系统管理需要我们了解生态系统对于外界影响变化的反应。因此,在生态学中显然需要一本教科书,作为各生态学科的基础框架参考书。

系统生态学主要包括四个方面:热力学、层级结构、网络理论和生物化学。本书将这四个方面组合成一个整体以试图理解系统,并不涉及该系统内部的详细整合信息。本书的最后一章着重介绍了将系统生态学应用于上述提及的生态学科的实例,希望能鼓舞更多的生态学家将来更广泛地应用系统生态学。只有将生态系统理论应用到诸多不同的情境中,才能使系统生态学未来得到提升和发展。我的两位科学家朋友已表示他们有兴趣将此书译成中文和俄文,这对于系统生态学是极其有利的,因为这将吸引更多的研究者和管理者来共同促进系统生态学的发展、广泛地运用生态学来理解自然并更好地进行环境管理。

Sven Erik Jørgensen

丹麦哥本哈根

2011年8月

目 录

第1章 系统生态学:一门生态学学科	1
1.1 什么是系统生态学?	1
1.2 整体分析	3
1.3 本书提纲	4

第一部分 系统生态学的科学基础

第2章 能量和物质的守恒	8
2.1 守恒定律	8
2.2 其他热力学函数	9
2.3 李比希最小因子定律	13
2.4 生物积累和生物放大	17
2.5 生态系统和生态圈中的循环	22
2.6 生态系统中的能量流动	24
本章小结	28
练习题/思考题	30
第3章 生态系统:生长和发育	31
3.1 最大功率原理	31
3.2 体现能/能值	35
3.3 生态系统:一个生化反应器	39
3.4 对埃三极这一热力学概念的技术和生态学解读	41
3.5 生态埃三极和信息	46
本章小结	48
练习题/思考题	49
第4章 不可逆性和有序性——热力学第二、第三定律	50
4.1 开放系统	50
4.2 物理开放性	51
4.3 本体开放性	52
4.4 生态系统中的热力学第二定律	57
4.5 应用于开放系统的热力学第三定律	60

4.6 耗散结构和生态埃三极	63
4.7 如何计算有机物和生物体的埃三极?	63
4.8 为什么生命系统有如此高的埃三极?	71
本章小结	71
练习题/思考题	72
第5章 生态系统的生物化学	73
5.1 生命系统的一个生物化学常识	73
5.2 向生物化学过程进化的第一步	75
5.3 原核细胞	77
5.4 真核生物	78
5.5 生命过程所需的温度范围	80
5.6 生命所需的自然条件	82
5.7 生态化学计量学	84
本章小结	86
练习题/思考题	87
第6章 生态系统生长与发育的热力学表达	88
6.1 引言	88
6.2 通过三种生长形式的热力学表达来描述生态系统发育	89
6.3 季节变化	96
6.4 新生态系统	98
本章小结	99
练习题/思考题	100
第7章 生态热力学定律	101
7.1 引言:达尔文理论	101
7.2 生态热力学定律	103
7.3 能够用 ELT 解释的基本生态学现象(规律)	105
7.4 结构动态模型	108
7.5 ELT 与进化论之间的一致性	116
本章小结	125
练习题/思考题	126

第二部分 生态系统的特性

第8章 生态系统是开放的系统	128
8.1 为什么生态系统必须是开放的?	128

8.2 异速定律和开放性的量化	129
本章小结	136
练习题/思考题	136
第9章 生态系统具有等级结构	138
9.1 等级结构	138
9.2 等级水平间的相互联系	139
9.3 变异和等级结构	142
9.4 干扰的频率	144
9.5 本体开放性和等级理论	147
本章小结	148
练习题/思考题	149
第10章 生态系统具有很高的多样性	150
10.1 引言	150
10.2 各种强制函数	151
10.3 生物化学水平的分子分化	152
10.4 遗传分化	154
10.5 细胞水平的多样性	155
10.6 器官水平的多样性	156
10.7 个体水平的多样性	157
10.8 物种水平的多样性	157
10.9 群落和生态网络的分化	159
10.10 生态系统水平的多样性	160
10.11 高生物多样性的优势	161
10.12 多样性与极端环境	164
本章小结	169
练习题/思考题	169
第11章 生态系统的强缓冲力	170
11.1 引言: 稳定性的概念	170
11.2 中度干扰假说	173
11.3 滞后现象和缓冲力	174
11.4 混沌、干扰和缓冲力	181
本章小结	187
练习题/思考题	188
第12章 生态系统组件构成的生态网络	189
12.1 引言	189

12.2	生态网络提高了物质和能量的利用效率	191
12.3	网络特性的主要假设	194
12.4	网络分析	196
12.5	生态系统的网络选择	210
	本章小结	213
	练习题/思考题	213
第 13 章	生态系统具有很高的信息量	214
13.1	基因体现的信息	214
13.2	等级	215
13.3	网络包含的信息和水平进化	220
13.4	生命就是信息	226
	本章小结	229
	练习题/思考题	230
第 14 章	生态系统显示了整体性系统特征	231
14.1	引言	231
14.2	生态系统的附加属性	234
	本章小结	236
	练习题/思考题	237
第 15 章	系统生态学在生态学分支学科和环境管理中的应用	238
15.1	综合性生态和环境管理应该基于深厚的系统生态学知识	238
15.2	系统生态学用于解释生态观察和生态法则	242
15.3	系统生态学用于解释生态工程中的原则	246
15.4	系统生态学用于评估生态系统健康	248
	本章小结	252
	练习题/思考题	253
参考文献		254
附录		266
索引		267
译后记		273

第 1 章 系统生态学：一门生态学学科

136 亿年前发生的大爆炸是万物的开端。

宇宙创造之初的大部分特征常数预示着生命的进化(参见 Laszlo, 2003)。

本书介绍的是生态学学科、系统生态学,或者说是生态系统理论。生态系统理论之所以能够提高环境管理水平,是因为其为预测生态系统对环境变化作出的反应提供了可能。本章讲述了本书的概要。对整体论的强调将贯穿全书。

1.1 什么是系统生态学?

系统生态学聚焦于生态系统的性质,并试图通过系统方法揭示这些性质——这是一种见微知著的方法。我们也可以认为这是一种生态系统理论,因为这门生态学的子学科旨在形成一套解释生态系统的典型过程和作用的理论,这与物理学有些相似,物理学能够解释物理现象,并且对物理系统因受到扰动而作出的反应进行定量预测。基于 25 条基本物理学定律,我们可以推理出许多不同的物理学定律和规律,解释我们所看到的现象,至少可以大致计算出定义明确的因子对物理系统产生的影响。这使得理论物理学非常实用,因为这意味着即使不进行实地的观测或开展实验,我们也可以定量预测系统针对定义明确的变化所发生的改变。图 1.1 显示的是理论物理学的这部分情况。

同样,如果我们能发展一条生态系统理论,那它应该能尽可能准确地预测生态系统对于特定污染物和特定环境变化(比如气候变化)的响应。生态模型已经发展到能够模拟生态系统在外部因子(用强制函数表示)变化时的反应。生态系统的反应可通过状态变量表示,它可以是生态系统中的物理、化学或生物组分。模型需要包含所谓的生态网络,它代表不同组分间的连接。外部因子,即强制函数或者其他对生态系统的影响可能先作用于系统的某一个组分,但由于各组分之间的相互关联,该影响将波及整个生态系统,直接或间接地影响所有的系统组分。当我们从模型的角度来思考问题,就可以理解生态系统理论所带来的优势。根据生态系统理论,当我们改变强制函数时,整个系统的状态变量会发生变化。图 1.2 解释了使用模型的理论依据。需要注意的是,强制

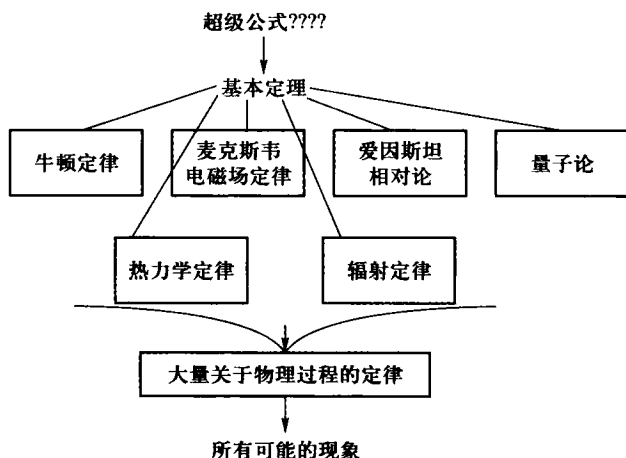


图 1.1 在物理学中,人们运用 25 条基本定律和在其基础上推导出的其他定律,可以解释所有可以观测到的现象。在物理学中还有一个宏大的设想,就是寻找一项可以解释所有 25 条基本定律的超级公式,然而,到目前为止,该设想尚未实现

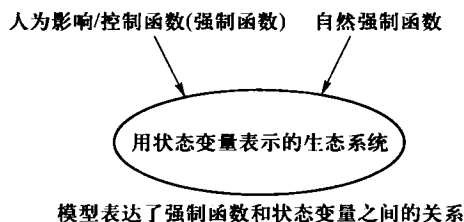


图 1.2 生态模型给出了强制函数和状态变量之间的关系

函数可以是人为控制的,也可以是自然状态下的,即无法人为控制,例如气候变化。

一个模型可以整合我们已知的所有生态系统知识和强制函数,包括理论值和观测值。要建立一个优秀的模型,拥有的理论知识越多,需要的实际观测就越少。

要建立一个生态模型,就要运用到所有关于该生态系统及其强制函数的知识,这既可以是理论知识,也可以是对状态变量和强制函数的观测数据。我们的理论越完善,对于观测的需求就越低。在物理学中,理论发展已经很完善,例如,向火星发射火箭时,我们可以很准确地计算出登陆火星的轨道数据。虽然我们与火星相隔 6000 多万千米,但我们可以准确预测火箭在火星上的着陆点,误差仅在 50 m 以内。我们的生态系统理论正在不断完善,比如,向一个已知水

动力模式的水生生态系统排放含有一定汞浓度的污水时,我们无需实际观测,仅通过建立模型,就可以估计处于食物链顶级的肉食性鱼类体内的汞浓度。然而,在没有实际观测的情况下,就需要一套更加完善的生态系统理论,才能预测所有的相关细节,如当大气中二氧化碳浓度从目前的 390 ppm^① 升至 500 ppm 时,苏必利尔湖将对气候变化作出什么响应。

因此,我们需要更加完善并且实用性更广的生态系统理论。这本书呈现给大家的是一套最新且实用的生态系统理论,大量案例和图表将被用于阐述如何应用这套理论解释观察到的现象以及如何定量计算和预测。然而,有些给出的案例也会表明我们的理论目前还不足以解释所有观测到的现象。一方面,生态系统理论发展到今天,仍有很大的上升空间。另一方面,对现有理论进行质疑是至关重要的,因为理论的持续应用是找出其缺憾并进一步夯实理论基础的最好方法。

1.2 整体分析

“整体大于部分之和”这句话是系统科学的核心观点,在所有其他科学学科中也有许多引用。这一观点最初是由亚里士多德引入科学界的,之后被众多科学家使用。有许多案例可以说明这一基本的系统论观点。我们举几个例子来说明当一个系统由互相作用的组分构成时,系统会呈现出不同于单个组分的新的性质。比如,一幅伦勃朗的油画,其价值要比所使用的画布和颜料的价值总和大得多。一个人的价值,如果你仅以他所含的 25 种元素计价的话,恐怕不会超过 25 美元,但是由于我们体内的 10^{14} 个细胞形成不同的组织一起工作,它们可以互相协调,控制许多自组织生化过程,使得我们可以运动、思考、感知、创造、认知等。同样,生态系统也是一个由许多生物体相互作用形成的有机整体。这些组分连接成一个互相协调、共同合作的生态网络,这可以用来解释适应、发育和进化,自组织,应对外界干扰的抵抗力和灵活性,甚至也包括生态系统之美。整体研究在系统生态学中的重要性将在第 14 章中详细论述。

没有一个系统能通过罗列系统的各个组分及其性质来描述系统所展现的性质,但是要想发现、理解和描述系统的这些性质,研究各个组分及其性质又是必不可少的。我们不得不通过了解树来认识整片森林。不过,如果我们能够了解生态系统是如何以系统的方式来工作的,那么就可以得出一套生态系统理论,用于预测强制函数发生具体变化时对生态系统造成的影响。目前,该理论

① ppm 表示百万分之一,即 10^{-6} 。

还不足以在没有观测数据的情况下对所有情况进行预测且预测结果的误差低到可接受的程度。但是一个好的理论可以在只有较少观测的情况下给出较理想的预测结果。目前,由于生态学和应用生态学的进步,包括生态模型、生态工程、生态指标和生态信息等子学科的进步,我们对生态系统内各种反应的理解比三四十年前的更深刻。在有些研究案例中,我们仍然需要不断补充观测数据,但这种对观测的需求显然已经远远低于三四十年前。系统生态学目前的发展水平还不能和理论物理学相比,但更深入的发展一定会使其被环境管理所倚重。无论是观测数据时的辅助或是缺乏观测数据,生态系统理论的广泛运用都势必会加速系统生态学的发展。

1.3 本书提纲

最基础且应用最广泛的科学定律可能要数热力学的第一、第二、第三定律了。生态系统和其他所有系统及其组分都严格遵循这三条定律。所有可能发生的生态过程都受这三条定律的限制或约束,即生态系统严格遵守这三条定律,这三条定律限制和决定了生态系统中的各种反应和过程。这使得我们通过综合所讨论的生态系统的已知强制函数或影响,依据三大热力学定律的相关限制条件,就可对生态系统的反应和过程进行理论预测。

三大热力学定律及其目前在生态系统中的应用将在第2章至第4章进行阐述。热力学基本概念是理解这三章内容和热力学在生态系统中的普遍应用的基础。人们通常觉得将基础热力学定律用于生态系统时晦涩难懂,但是这是最基础的部分,应该尝试去理解它所告诉我们的关于生态系统及其相互作用的信息,这是非常重要的。因此,本书用三章的篇幅来详细论述三大基本定律及其在生态学上的应用。

第5章阐述了一些所有生物都必须遵循的基本生物化学特性。所有生物组分的生物化学过程都有着惊人的相似,也就意味所有的生物体对于20~25种元素都有极为相似的需求。其中的6种元素是所有生物生存所必需的。此外,生化过程的反应速率设置了生命的其他条件。所以生物化学过程成为生态系统的又一个约束或限制因素。

尽管生态系统中的能量和物质是守恒的,所有的过程是不可逆的,所有的生物组分都必须遵守基本的生化要求,但是,生态系统仍然能够不断地发育和发展。生态系统可以通过利用开放能流以及三种生长和发育方式,在热力学和生化条件的约束下得到发展的可能性。这三种生长和发育方式指生物量的增加、生态网络复杂性的增加和信息量的增加。生态系统可以利用它的开放性获

得足够的可做功能量,进而选择一条使生态系统尽可能远离热力学平衡的发展路径,系统根据当时环境下可获得的最大做功量(也被称为生态埃三极),将在限制条件下达到最大程度的生长和发育。这也是最后一条定律——生态系统选择一条发展路径使其获得最大生态埃三极(做功量),可以被认作是达尔文理论的热力学表达,这部分内容在第7章中有详细论述。第6章和第7章的内容可以归结为对生态热力学定律(ecological law of thermodynamics, ELT)的系统阐述,有时也被视为热力学第四定律。本书的第一部分涵盖了生态系统的各种限制因素,一方面,生态系统在给定的外界环境下必须遵循热力学定律和生化组成规律,另一方面,生态系统也必须通过稳定的生长和发育来保证其生生不息。各种限制因素对生态系统的限制,以及系统在有限制的情况下地不断生长和发展的能力,使得生态系统具备了7条非常基本的,也是必不可少的重要性质:

- 生态系统是远离热力学平衡的开放系统(这是热力学第二定律的直接推论);
- 生态系统具有层级结构;
- 生态系统是高度多样性的;
- 生态系统有很好的缓冲容量,使得它不易被外界的强制因素彻底改变;
- 生态系统中的各个组分组成有序网络,允许循环和反馈调节,并且保持最高效率的做功(埃三极);
- 生态系统有很大的信息容量,包含在生物体的基因组中,可以用来解释高度发达的反馈和调节机制;
- 生态系统由于具有远离热力学平衡的发达组织和结构,因而展现出系统的性质。

这七条基本性质在第8章至第14章中有详细论述。第一条性质,系统的开放性,在讲述热力学第二定律时已经涉及,因为前者与后者的结果密切相关。这七条性质都是进化的结果,都是生态系统受到环境条件、热力学三大定律的限制,以及生物化学对生命过程的约束时为了生存、生长和发育而做出的努力。

本书所述的系统生态学的整体论观点具有广泛的应用,比如解释生态学现象,用于保护生物学、生态建模、生态系统健康和可持续发展能力评估,以及生态技术等。在第15章中,将通过几个例子来论证生态系统理论用于应用生态学子学科的重要性。它是环境管理的基础,也是帮助环境管理者尽可能减少人类对不同类型生态系统和自然界的负面影响的工具箱。这个工具箱有效连接了环境管理和生态学,使得人们在制定控制污染的环境管理方案时能够将生态学以及生态系统一并考虑在内。

第8章至第15章是本书的第二部分,论述系统生态学的七条基本性质和生态系统理论在几个生态子学科中的应用。

生态系统理论可以归结为 14 条规律,在第 2 章至第 14 章中进行了论述。从某种意义上说,生态系统理论完全可以涵盖平时所观察到的生态过程,但是需要广泛的实际应用来对其进行检验,找出其中的薄弱点,并进行改进,从而形成一套更可靠的关于生态系统及其相互作用和过程的理论。

关于生态系统的性质和过程的 14 条规律是:

- (1) 和其他系统一样,生态系统的物质和能量守恒;
- (2) 生态系统中的物质为完全循环,能量为部分循环;
- (3) 生态系统中的所有过程都是不可逆的、熵增的,并且消耗自由能(可做功的埃三极或能量);
- (4) 生态系统中所有的生物组分都有同样的基本生物化学性质;
- (5) 生态系统是开放系统,需要输入自由能(可做功的埃三极或能量)来维持其功能;
- (6) 如果输入的自由能超出了生态系统维持自身功能的需要,过剩的自由能会推动系统进一步远离热力学平衡;
- (7) 生态系统有许多远离热力学平衡的可能性,并且系统会选择使其离平衡状态最远的那条途径。
- (8) 生态系统有三种生长模式:①生物量的增长,②网络的增强,③信息量的增加;
- (9) 生态系统具有层级结构;
- (10) 生态系统在其每一个层级都具有高度的多样性;
- (11) 生态系统具有较高的应对变化的缓冲能力;
- (12) 生态系统中的所有组分在一个网络中协同工作;
- (13) 生态系统具有海量信息;
- (14) 生态系统显示出系统的特征。

第 一 部 分

系统生态学的科学基础

第2章 能量和物质的守恒

太阳是地球上所有活动的终极能量来源。

没有太阳,地球上所有的一切都将死亡。

天下没有免费的午餐。

2.1 守恒定律

本章将介绍重要的守恒定律,以及与可做功的自由能有关的一些热力学关键函数。自由能和化学平衡态的关系在本章内容中至关重要。在生态学中,守恒定律可以用于理解李比希最小因子定律、生物积累效应、生物放大效应和循环过程。

热力学第一定律表述为能量是守恒的,不能被创造和消灭,通常用如下的数学形式来表述:

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W \quad (2.1)$$

式中: U 是能量, ΔU 是增加的能量, ΔQ 是从环境中吸收到的热量, ΔW 是环境对系统做的功。该公式表达了两种形态的能量:热量和可以做功的能量。能量的获得指的是系统从环境中获取热量或者环境对其做功。

这种对能量守恒原理的理解被称为热力学第一定律,最先由 Rumford 在 1778 年提出。他发现,在金属上钻孔会产生大量的热量。于是他假设,机械功通过摩擦转化为热。他提出热是能量的一种形式,可以从另外一种能量形式转化而来,在这个例子中就是机械能。这让 J. P. Joule 在 1843 年提出了一个关于机械能与热量转换的数学公式。

J. R. Mayer 和 H. L. F. Helmholtz 这两位德国物理学家分别发表了他们的研究结果,即当气体膨胀时,其内部的可做功的能量就会减少,减少的量与所做的功成正比。这些观察结果都指向了热力学第一定律,即能量既不能被创造,也无法被消灭。

内能的概念(dU)可以用如下公式来说明:

$$dU = dQ - dW (\text{M} \cdot \text{L}^2 \cdot \text{T}^{-2}) \quad (2.2)$$

式中: dQ = 输入到系统中的热能; dU = 系统内能的增加; dW = 系统对环境做的

功。当然,环境对系统做功会增加系统能量,如公式(2.1)所表述。

人们通常用不同的方式阐述这个重要的定律,公式(2.1)和公式(2.2)的区别不仅在于公式(2.1)用 Δ 表达,公式(2.2)用微分形式表达,而且公式(2.2)中的功是系统做的功,而公式(2.1)中的功是对系统所做的功。两个公式都用于科学论著。

能量守恒原理也可以用如下的数学形式表示:

U 是一个状态变量, $\int_1^2 dU$ 是 U 从途径 1 到 2 的变化值,与途径无关。

在生态学中几乎不存在从物质直接转化而来的能量形式,但在核过程中,从物质转变为能量是可能的。爱因斯坦通过他的著名公式 $E = mc^2$ 已经能够计算出多少能量 E 可能通过物质 m 的毁灭而获取。 c 为光速,约 300 000 km/s。不过,放射过程造成的质量变化在生态学中没有太大的意义。

由于生态学中不考虑核过程,物质就像能量一样,是守恒的,表示如下:

$$\text{积累} = \text{输入} - \text{输出} \quad (2.3)$$

这表明不仅能量,物质也可以用等式来表示系统与环境的交换过程。获得的物质减去向环境中失去的物质,就可直观地告诉我们系统中积累的物质的量。有时这个等式用浓度来表示:

$$dC/dt = (\text{输入} - \text{输出})/V \quad (2.4)$$

式中: C 为物质在系统中的浓度, V 指系统的体积。在有些情况下,浓度以单位面积的量来表达, V 就被面积 A 所替代。

如果物质守恒定律用在化合物的转化过程中,就必须将公式(2.4)变形为:

$$V \cdot dC/dt = \text{输入} - \text{输出} + \text{生成} - \text{变换} (M \cdot T^{-1}) \quad (2.5)$$

物质守恒定律广泛用于生态模型中的生物地球化学模型。就像在生态学中不考虑或极少考虑辐射过程一样,物质守恒定律可用于所有元素。公式只被用来计算有意义的元素,比如,对富营养化模型来说,所考虑的是 C、P、N,可能还有 Si(见 Jørgensen, 1976a, 1976b; Jørgensen 等, 1978; Jørgensen, 1982)。

总结:生态系统在能量和物质上的守恒意味着系统和环境之间的交换过程是可记录的,可以计算系统获得或失去的物质、能量,甚至每一种元素。

热力学第一定律也可以用普遍的人类经验来表述,即自动产生能量的永动机是不可能出现的。

2.2 其他热力学函数

功可以用很多形式来表示。如果我们假定在大气压力常数 p 下,做功带来