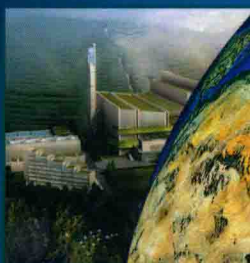


普通高等教育“十三五”规划教材

环境系统分析

宁平 孙 曷 编著



梁外借



化学工业出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

环境系统分析

宁平 孙 嵩 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书共分为6章,概述了系统分析的原理与方法,详细论述了环境系统的模型化与最优化,并探讨了环境系统规划与环境系统决策的基本方法。书中列入了较多的算例,每一章都附有习题与思考题,具有较强的知识性和参考价值。

本书可作为高等学校环境科学与工程及相关专业的本科生、研究生教材,也可作为从事环境规划、评价、设计等领域的技术人员、科研人员和管理人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

环境系统分析/宁平,孙磊编著. —北京:化学工业出版社,2017.12
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-122-30832-0

I. ①环… II. ①宁… ②孙… III. ①环境系统-系
统分析 IV. ①X21

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第255951号

责任编辑:满悦芝

文字编辑:孙凤英

责任校对:边涛

装帧设计:张辉

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:三河市双峰印刷装订有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张10½ 字数249千字 2018年3月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:35.00元

版权所有 违者必究

前言

环境科学是一门高度综合的学科。可以说，在原理上只要涉及生态的演化、物质的迁移、气候的变迁等内容，并在方法和技术上与环境改善、污染治理等有关的内容皆可以被纳入环境科学范畴。原理和方法的综合和交叉是环境科学的一大特征。而且多学科的交叉和相互渗透，也使得其子学科——环境工程学变得复杂。

要想在这样一个内涵丰富的学科领域处理科学上或者工程上的具体问题，除了需要根据现实情况正确选择和利用不同门类学科的知识，有时还必须综合地给出一套不同于以往的解决方案。这意味着，人们不仅首先要精通具体学科的原理和方法，还需要具备系统综合和分析的能力。比如说，生态学、流体力学、化学、化工原理等的具体科学在环境科学以及环境工程学中的地位突出，其原理是形成某些治理具体环境污染问题的科学方法论基础，甚至某种程度上这些具体科学已经成为了环境科学或环境工程学分析问题和解决问题的主要支撑；但是，很多时候利用其中单一学科或单一原理其实并不能完全支配某些复杂环境问题，不仅如此，很多环境污染问题或者与此相关的各种现实问题，又与社会科学或经济学之间并非没有现实牵连；所以，在处理环境问题时，我们常常需要更多学科的“会诊”，完成针对问题本身的系统架构，有时为了解决复杂的、综合的环境问题，甚至需要重新建立理论框架——以问题为导向寻找或重新排列矛盾的先后顺序、整理知识脉络。这表明，在环境科学或工程学领域，学科的综合和交叉对研究者提出了更高的要求，也突出了“系统观”和“系统论”的重要性。

如果仅在概念上、观点上强调系统观不免有些空洞，现实工作中完成“系统论”并不容易，不仅要求人们了解具体学科，而且“系统观”还应是一种以问题为导向的综合视角。在面对多学科因素共同影响的复杂问题时，为了分析问题和解决问题需要人们剔除次要因素，在多学科中筛选决定性原理，并找到学科之间关键的相互联系。有时，人们还需要建立不同以往的知识框架，并与同类问题之前的某些解决方案有所差异，甚至与某一门现成的具体科学本身的固有知识体系有所差异。

这里说“系统观”是处理复杂交叉学科的具体应用问题的一种先进的思想方法，然而，“系统”应该如何协同？既然环境问题牵扯各种原理 and 知识，而为了解决复杂问题本身，不论是在知识或信息层面上（需要综合各种信息，形成全新的知识地图），还是在现实层面上，都应找到冗杂关系中的突出矛盾，归纳支配原理。而这，没有数学工具和分析手段则无法做到精致和精准。

随着计算机科学的发展，数学的应用范围逐渐扩大。数学能够在机理上给出事物变化发展特征量的关键描述，其建立于人们对事物的深刻认识的基础之上。随着很多领域具体科学步入成熟，以及数学本身和计算机技术的发展，数学的方法被越来越多地应用于各种现代科学的应用领域。

从应用的角度上讲，这里强调“数学模型”而非数学科学本身。“数学模型”的一大优势在于其灵活性，特别适用于具体问题具体分析，针对不同的系统内涵和目标可以建立不同

的模型。“数学模型”是追求与现实关系原理上相似的知识产品。其不仅已经出现于各种具体先验唯物科学当中，对于新的复杂问题和复杂研究对象，同样需要用量化的手段描述其中已有的关键特征和关系并组织成为人们能够把握的知识产品，而出现在各种规划应用领域。数学模型能够帮助人们对复杂问题建立正确的协同观念，帮助人们进行完整的系统分析。“模型的方法”是“系统观”的基本方法论手段，也是近代交叉科学的关键认识工具。

本书强调“系统观”和“模型方法”的融合，也强调了在处理综合的环境科学应用问题的同时不能脱离于具体科学。

本书共分6章。与其他环境类的书籍略有不同，它并不是按照大气、水环境和固体废物的类别划分章节的，为突出模型方法灵活性，本书主要按照环境科学中模型应用的类别划分章节。内容主要涵盖“模型模拟”和“模型优化”，部分章节涉及“模型预报”。这样与众不同的安排，并非为标新立异，而是希望这样能够更好地成为环境科学同类书籍的参照，帮助读者在这个较为开放的应用领域全面了解模型化的方法。除了第1章为绪论以外，其余各章分为以下两大部分。

第一部分包括第2章到第4章，重点讲述物质的迁移、转化规律，主要涉及流体力学和水环境、大气环境系统模型，基本立足于具体学科。模型属于从具体学科中总结出来的机理模型。突出各类变化和传递现象中的质量、能量和动量守恒律。第4章把三维扩散方程的有限差分方法单独拿出来介绍，独立成章，分门别类便于有需要的读者学习和查阅。第4章中所介绍的常微分方程的求解方法可用于解第2章中的箱式模型。其中第4章中的对流方程的改进差分方法是全新内容。

第5章和第6章为第二部分，主要内容是环境规划（优化）。所涉及模型属于规划模型。这与之前部分所主要介绍的机理模型不同。本书机理模型主要立足于质量、能量和动量守恒律。规划模型求解的是在一定客观条件限制下，达到合理目标下人的（环境）干预对策的最优化。第5章把数学规划的理论和方法单独整理，作为基础内容独立成章，以便读者学习和使用时查找。第6章收集了6个环境规划（优化）的例子，内容涉及颗粒物的粒径分布问题、风机微选址问题、轨道交通运力优化问题、大气污染物的统计预报问题、海水入侵问题等多方面。第6章大部分内容属于原创性工作。第6章与其说是有体系的完备理论，不如说是为不同综合系统问题设计解决方案的一部记录，但又尽可能充分地给出相关具体科学领域的理论或方法，或者相关指引和标注，意在形成一些原理性的沉淀。其实全书也具有这样的特点。

应该强调，环境科学的优化不同于经济优化。环境优化需要全面考虑环境与经济的综合效益。在环境科学中，应该摒弃仅单方面追求经济利益的目标设定、建立模型，而应平衡人为活动对环境的影响，寻求最优结果或“效用最大化”。

不可避免地，本书内容涉及环境科学和应用数学两个体系。第4章和第5章为本书另一个体系内容，属于环境系统模型需要使用到的应用数学知识和理论。第4章归属于计算数学（数值方法）分支，第5章归属于最优化理论分支。当中出现的定理证明仅就数学命题而言，而现实问题的建模依据于现实规律，因此两者理论框架属于不同体系。

在环境类书籍中对数学基础理论相关部分的编辑是个难点：其一不能回避，其二不能过深。如果本书回避基础数学理论，让本书仅成为环境科学常用模型的罗列，则不能从根本上满足读者和建模工作者使用的要求，也不能让读者学得求解模型的一般方法。但是如论述不到位，或者将此部分内容穿插到其他章节并仅有所提及，必使读者不能深入理解；数学和其

他具体科学有不同的说明和论述规范，不恰当地穿插更容易造成逻辑上的混乱。作为一本学科交叉明显的书籍，本书将建立模型和求解模型分开编写，将具体应用和基础数学内容分开，各自说明论述，恰恰便于不同学科背景读者的阅读理解和查阅使用。而且，书中已有的模型例子毕竟有限，如遇新问题，读者可以查阅此两章节的数学方法推广应用。

本书可作为环境科学和环境工程专业“环境科学系统与模型”“环境系统分析”或者“环境模拟”的高年级本科生或研究生课程教材，也可以作为数学建模和相关领域的参考用书。书中“*”所标注的部分难度较大，可作为选学内容。

在这里要衷心地感谢北京大学运筹学专家王其文教授对本书第5章提出的修改意见。王教授宝贵并且细致的工作让此部分论述更加严谨。还要衷心地感谢上海交通大学数值计算方面的专家严波副教授对本书第4章提出的专业修改意见。

编著者才疏学浅，错漏在所难免，望读者多多批评指正！

编著者

2017年11月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 环境科学是多原理综合学科	1
1.2 系统和系统化	2
1.2.1 系统的含义	2
1.2.2 复杂问题的有限系统化	3
1.2.3 系统工程与系统间工程	3
1.2.4 环境科学问题的系统化	3
1.3 环境类问题的系统特点	4
1.3.1 系统的元素和元素的特征	4
1.3.2 系统的层次	4
1.3.3 系统的功用和定义方式	5
1.3.4 环境科学的系统视角	6
1.4 环境系统的模型化	7
1.4.1 模型和模型方法	7
1.4.2 数学模型	10
1.4.3 环境系统的数学模型分类	11
1.5 关于规则和模型	13
1.5.1 规则和模型的多样性	13
1.5.2 发现规则和建模	13
1.5.3 建立规则和建模	14
1.5.4 模型的验证	15
1.5.5 不确定规则的支配原理	16
第 2 章 箱式动力学模型	19
2.1 几种水环境转化模型	19
2.1.1 浅海生态系统物质转化模型	19
2.1.2 环境水体的氧浓度模型	21
2.1.3 湖泊污染物箱式模型	24
2.1.4 湖泊多箱体模型	25
2.2 反应系统动力学模型	29
2.2.1 化学反应动力学	29
2.2.2 微生物反应动力学	30
2.3 灵敏度	31
2.4 总结	32
第 3 章 流体动力学模型	35

3.1	扩散和传输	35
3.1.1	分子扩散菲克定律	35
3.1.2	浓度的扩散方程	36
3.1.3	物质的传输和扩散	37
3.1.4	浓度的传输-扩散方程	37
3.1.5*	关于浓度方程的进一步讨论	39
3.2	流体的传递	42
3.2.1	流体的质量衡算方程	43
3.2.2	以分布和传递的视角观察流体	44
3.2.3	流体的惯性和惯性的传递	46
3.2.4	关于动量通量和力	47
3.2.5	三种动量的传递方式	48
3.2.6	流体的黏性应力	49
3.2.7	流体动量传递的一般衡算方程	53
3.2.8	Navier-Stokes 方程	55
3.2.9	流体状态	55
3.3	一维河道的物质的迁移-转化模型	56
3.3.1	圣维南 (Saint - Venant) 方程	56
3.3.2	一维河道的传输-扩散-转化方程	58
3.3.3	河流模型的应用	58
3.4	二维浅水湖泊的物质迁移-转化模型	60
3.4.1	二维浅水方程 (Shallow Water Equations)	60
3.4.2	二维浅水湖泊的传输-扩散模型	62
3.4.3	算例演示	62
3.5	大气的三维物质迁移-转化模型	64
3.5.1	不可压大气模型	64
3.5.2	包辛涅斯克 (Boussinesq) 近似	65
3.5.3	特殊密度气体的运动方程	66
第4章	对流-扩散-反应方程的有限差分解法	69
4.1	对流方程的有限差分解法	69
4.1.1	一维 (阶) 对流方程的“迎风格式”	69
4.1.2*	一维 (阶) 迎风格式收敛性讨论	71
4.1.3	一维 (阶) 迎风格式的改进和优化	72
4.1.4	改进的高维 (阶) 迎风格式	74
4.1.5*	改进的高维 (阶) 迎风格式的收敛性	75
4.2	扩散方程的有限差分解法	76
4.2.1	一维扩散定解问题的有限差分格式	76
4.2.2*	一维扩散定解问题差分格式的收敛性	78
4.2.3	三维扩散定解问题的有限差分格式	81
4.2.4*	三维扩散方程差分格式稳定性分析	82

4.3	反应方程的数值解法	83
4.4	传输-扩散-反应方程的数值解法	85
第5章 数学规划		87
5.1	概述	87
5.1.1	数学规划概念	87
5.1.2	数学规划的分类	87
5.1.3	最小值点、极小值点和驻点	88
5.2	无约束问题求解	89
5.2.1	无约束规划的驻点方程	89
5.2.2	求驻点方程的牛顿迭代法	90
5.2.3	一维搜索	91
5.2.4	最速下降法	92
5.2.5	共轭梯度法	94
5.2.6*	搜索相对全局最优解的一种方法	97
5.3	等式约束问题	99
5.3.1	等式约束问题及其必要条件	99
5.3.2*	拉格朗日极值条件的几何解释	100
5.4	一般规划问题	102
5.4.1	一般规划问题的松弛变量法	102
5.4.2	不等式约束规划的逼近算法	103
5.4.3	混合约束规划的逼近算法	108
5.4.4*	关于障碍函数法的数学分析	110
5.5	线性规划	115
5.5.1	线性规划及其标准形式	115
5.5.2	线性规划解的结构	116
5.5.3	线性规划的求解	117
第6章 环境规划问题		122
6.1	利用最大熵原理得到粒径分布	122
6.1.1	问题提出	122
6.1.2	利用最大熵原理得到分布函数	124
6.2	平原风电场风机的直线排布问题	127
6.2.1	问题的提出	127
6.2.2	阻力和功率	128
6.2.3	风速的衰减	128
6.2.4	风机直线排布规划模型	129
6.3	山地风电场风机选址问题	130
6.3.1	问题的提出	130
6.3.2	模型框架	133
6.3.3	模型细化	133
6.3.4	模型求解	134

6.4	单线地铁趟次调度最优化问题	136
6.4.1	问题的提出	136
6.4.2	系统特征变量	136
6.4.3	模型的建立	138
6.5	大气污染物时间序列监测指标预报问题	139
6.5.1	问题概述	139
6.5.2	简单时间序列模型	140
6.5.3	综合预报模型	142
6.5.4	模型验证	143
6.5.5	模型预报	146
6.6	海水入侵规划问题	146
6.6.1	问题陈述	146
6.6.2	渗流方程	147
6.6.3	海水入侵问题规划模型	150
参考文献		156

第1章 绪 论

1.1 环境科学是多原理综合学科

传统的具体学科，例如化学、力学、光学和电学等，具有明确甚至单一的一类研究对象，因此也相对容易找到某一个具体原理为该学科的核心。比如说，化学以分子的组成为研究对象，以热力学定律、质量守恒定律为基本的原理；力学以物体的运动为研究对象，以牛顿运动定律和动量守恒定律为原理；遗传学则以基因和分子为研究对象等。但是环境科学往往并不集中于某一研究对象，而是将与环境或环境保护相关的一切问题作为研究对象。

与其他各种具体学科不同，环境科学是多对象、多原理学科。环境科学研究所涉及的内容丰富，涉及的学科背景知识庞多；环境科学视野开阔，体系庞杂。其并不仅针对某一个单一的研究对象而设立。因而按照传统的学科分类，将环境科学划归为一种学科不免有些牵强。首先，环境科学是学科交叉融合发展的产物，也是近现代环境污染问题日益尖锐的产物。比如，环境科学既可以包括具体污染治理的化工技术和方法，也可以包括宽泛行政和政策研究。可以说，所谓“环境科学”的概念指的是现代学科的一种应用领域和发展方向，而非某一个传统的或是古典学科的分类。其次，在具体学科范畴，诸如环境应用的化学问题、环境应用的物理问题以及经济学问题，在各类具体科学的应用领域方兴未艾，却也可以被很自然地纳入环境科学范畴。所以从另一个角度上讲，环境科学也是传统科学应用渗透和迁移的方向。因此，如果一定要将环境科学定义为一门学科的话，这必然是个学科综合以及技术融合的复杂的体系，而在其应用领域结合了多学科理论内容和技术方法，是个多对象多原理的学科。

所以对于环境科学，很难直接找到某一个单一的原理被广泛公认地称为所谓“环境科学基本原理”。这意味着，既然环境科学是多对象学科，关于它的研究内容和研究方法不能一概而论，而应将复杂环境问题分解为多个问题，并牵扯于不同具体科学，利用具体科学各自原理有重点地分别解决，最后可以在系统框架下协调综合。比如说，物理学当中的“守恒律”原理被广泛应用于诸如湖泊等相对封闭体系的物质迁移、转化规律的量化研究；生态学的“多样性”原理在环境科学其他领域有所应用。“最大熵”原理最早产生于信息学，其所揭示的“最大复杂度”原理与“多样性”原理不约而同地一致，而成为环境科学中某些领域的量化原理。经济学当中的最大效益或最小代价原理同样适用于环境规划问题，所不同的是，环境规划问题除了需要考虑经济利益，同时需要重点兼顾环境效益。这些原理，对于不同具体问题，各自体现某些环境问题的主要方面。

文献《环境学原理》^[1]强调了“环境多样性原理”“人与环境和谐原理”“规律规则原理”和“五律协同原理”，并将这四方面归纳为“环境科学的四个基本原理”。具体地讲，“规律规则原理”的提法旨在重申人的行为应当与所干预对象的具体规律一致，承认环境科

学多对象、多原理的客观性；但其对所谓“规律”“规则”的论述有待明晰和深入。而其所谓“五律”是指：自然规律、技术规律、经济规律、社会规律和环境规律，是使用系统的思维方式对复杂问题的一种概念性的粗略探讨。“环境多样性原理”来自生态学具体科学。只有“人与环境和谐原理”最终体现了环境科学的导向问题。

虽然环境科学包括多原理、多对象，然而这并不是说环境科学的研究缺乏导向，没有从旨；而这里首先应承认一个环境科学的基本原理，以便以此把握各种具体学科的相关科学原理。环境科学的导向必定是有益于环境保护、防止与防治环境污染和恶化的，因而名之为“人与环境和谐原理”。本书以此为环境科学基本原理。

在环境和谐导向意义下，如何估计和评价人对各种具体科学理论以及相关技术方法或者技术产品的使用对环境造成不同可能影响的问题，应是环境科学研究行为首先要做出的技术判断问题。如何避免、缓解以及改善各类环境恶化问题是环境科学方法论的关键性问题。

环境科学不讲系统观和模型论，以上两类问题难以回答。

1.2 系统和系统化

1.2.1 系统的含义

关于系统的定义并不唯一，现有选择性地列举几个系统的定义。

前苏联出版的《苏联大百科全书》中，“系统”一词的解释是由相互联系、彼此相关的构成一定的整体、统一体的因素的集合。

在《韦氏大辞典》(Webster 大辞典)中，“系统”一词的涵义是有组织的或被组织化的整体；由有规则的相互作用、相互依存的形式组成的诸要素集合。

前苏联哲学家列·尼·苏沃洛夫认为系统是某种统一的和整体的共同性，它具有其存在的某些内在规律。系统是由存在于某些关系中的大量要素构成的。他还说：每一系统都是更高层次的系统的要素，它的要素又是低层次的系统。

我国科学家钱学森在 1978 年提出：我们把极其复杂的研究对象称为系统，即相互作用和相互依赖的若干组成部分合成的具有特定功能的有机整体，而且这个系统本身又是它从属的一个更大系统的组成部分。

我国 1987 年出版的《中国大百科全书-哲学卷》关于系统一词的释意是：系统(System)是由元素组成的有机整体。

不论“系统”如何定义，从概念上讲“系统”无非是“元素”和“关系”。更深层次上讲，一个系统还应包含“三个特征”。

这三个特征是：其一，系统和元素的相对性。系统由元素所组成，系统可以分解为各元素。复杂系统由一系列子系统构成，子系统是大系统的元素，子系统内部同样保持系统与元素的相对性。其二，元素间的相互关系。系统的元素之间存在相互影响或反馈机制，或者相互转化的可能性，这种元素间的关系网是组织并使其成为系统的依据之一，或定义系统的依据之一。其三，系统的层次性。大系统可划分为子系统，相对地讲子系统是大系统的元素；并且子系统内部包含了组成子系统的各元素。此为两层系统，如有必要，系统可以分更多层次。系统的层次性体现在：子系统元素不能直接影响整体大系统，其必须通过影响子系统，而间接影响整体。

1.2.2 复杂问题的有限系统化

除了需要在概念上给出单个既成系统所具备的特征描述,这里还应说明定义系统的依据。

首先,本书强调有限范围内的系统定义。也就是一个系统的定义必须被限制在一个范围内,而不能无限扩大系统的外延。这里说有限范围内定义系统,并非否认“系统”具有“开放性”,也就是并不否认研究对象本身是处于更大的关系范畴内部。有限范围内定义系统是突出研究对象本身,强调研究对象的主要特征,将其他较弱的关系或影响放在次要的地位。

不容否认,对于同一个或一组研究对象,仍然存在不同的系统定义方式。所以不论人们以何种方式界定系统,定义系统或划定系统范围,很大程度上取决于研究对象对人们的功用或价值。或者说,人们是在某种功能或价值意义下组织(单个或多个)研究对象建立系统框架的。这里强调,组织研究对象而建立有限系统是基于研究对象对人或现实社会的价值功用。所以系统的定义方式并不是僵化的。因此,系统以及系统中的元素的定义和划分不能排除人的主观因素和意图,以及复杂对象对于人的意义。这就是这单个有限系统的功能或功用属性。

1.2.3 系统工程与系统间工程

定义系统,应该有限地将研究对象放在人的活动或社会活动能够把控的范畴。所以才可以进行进一步讨论“系统工程”的概念。

“系统工程”(System Engineering)与“系统间工程”(Systems Engineering)的意义并不完全等同。系统工程是指在既已定义的可人为支配的系统的框架范围内,以系统功用最优化的目标支配并调整系统各要素之间的关系,而达到或趋近最优化的目的。系统间工程是指如何调整并协同不同系统之间的关系,实现整体目标的优化。

后者强调不同系统的协同,而前者突出整体视角下单个系统内部的优化。实际上,仅从概念上讲,如果把多个系统组织成一个更为庞大的系统,则对这个庞大的系统进行系统工程,也就是系统间工程了。之所以要区分两种概念,是因为社会劳动和分工的复杂现实,要求人们不仅首先需要从科学研究的角度看待复杂问题,还需要进一步在社会劳动的协同中优化各种关系。

1.2.4 环境科学问题的系统化

本来,从整体上说环境就是一个系统。环境中各种物质存在相互联系和作用,从范围上讲其可以是全球性的也可是局部范围的;在时间上有其演化发展的历史,或者在小的时间尺度上存在一定周期性的变化规律。而且从环境要素的特征和细节上,以及从演化的机理和趋势上,无不体现着环境要素之间的复杂联系。

但是,环境要素的联系表现出相对性,要素间的相互影响和作用在一定范围内是有限的。这为人们有限划分系统提供了便利,也给研究者以不同角度认识复杂事物提供了切入点。

基于环境科学多对象和多原理的特征,主张针对具体问题具体分析,将环境类问题细化和分化归并于不同具体科学中处理,同时,详细考虑不同对象或类别之间的相互影响和牵连,建立系统框架和知识体系。

而利用整体和联系的观点审视复杂环境问题,以现实功用和对象属性定义系统,可以把复杂事物不同侧面的特征突出体现,则能发挥系统观点的优势。

这些就是环境科学问题或研究对象的系统化。在学科交叉中，利用系统科学研究的观点和方法展开环境科学的研究，是环境科学发展的一个方向。

1.3 环境类问题的系统特点

1.3.1 系统的元素和元素的特征

环境科学的研究对象常常非常复杂，必须以系统化的思想去认识，将对象在一定的框架下分解和综合，在系统内部应以研究对象的特征定义元素。

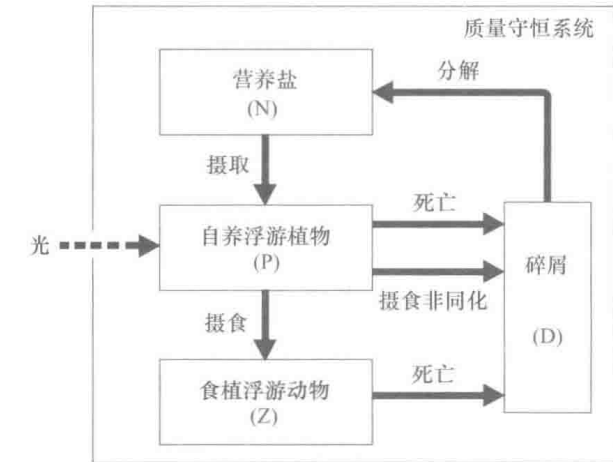


图 1.1 海洋底层生态系统 NPZD 关系模型
物质转化示意图

比如说浅海生态系统，为了研究简便，著名的 NPZD 浅海生态模型把生态系统中诸多物种归类为 4 个大类，它们是：营养盐 (Nutritive Salt)、自养浮游植物 (Phytoplankton)、食植浮游动物 (Zooplankton) 以及碎屑 (Debris)，如图 1.1 所示。当然也可以各个物种自成一类，独立研究。而浅海生态系统中物种数量十分繁多，可想而知这样做则会将问题复杂化，同时相对弱化物种类别之间的关系。

“元素”和“关系”构成了“系统”。

对研究体系“元素”和“关系”的归纳都必须建立于研究对象或物质的功能或特征这些属性上。NPZD 浅海生态系统中，四类物质营养盐、自养浮游植物、食植浮游动物以及碎屑各扮演浅海生态系统的一种“元素”，取而代之以具体生物为繁复的划分。而划分这些类别的标准，在于其在浅海生态系统物质循环和能量循环过程中所表现出的功能或功用。这种功能上的差异即为“特征”。具体地讲，元素间关系能够成立的核心在于抓住了物种是否能够通过利用光源合成有机物质而维持生命这一特征。NPZD 系统模型则清晰地表达出了物质之间物质和能量转化和走向。因此所谓“特征”即是划分系统元素建立元素关系的切入点，系统框架或模型建立的关键。

1.3.2 系统的层次

元素间关系的间接性，以及系统和元素的相对性决定了系统具有层次性。有时一个系统比较复杂，元素本身还可以继续再被进行细化，将第一层元素再次划分为由若干子元素所组成的子系统。子系统和大系统之间处于两个层次。存在子系统的大系统具备系统的层次。子系统内部元素之间存在关系，各个子系统在大系统内部彼此存在关系，由于关系的间接性，不同层次子系统可以被定义。这可以拿微生物工艺系统说明^[2]。

一般认为，微生物生长和微生物产品的生产系统结构具备四个层次。其从低到高依次是：分子水平层次、单细胞层次、种群层次和生物反应器层次，最后由生物反应器组成系统整体，如图 1.2 所示。

首先生化工艺系统是整个生产的宏观系统，各个反应器是生化工艺系统的子系统，此为 0 层系统。而各个反应器本身是复杂的生化系统，为第一层子系统。其由微生物种群体系构

成。微生物种群之间以竞争、捕食、共生等生物间关系组成此第二层次子系统，当中各微生物种群为第二层次子系统的子系统。微生物种群是第三层子系统，其由细胞为子系统构成。细胞之间由微生物代谢、物质交换建立联系，此为第四层系统结构。更进一步，在分子化学角度上观察第四层系统的子系统。有机物质与无机物质为系统元素，其间通过生物化学反应建立元素间联系。如有必要，出于细致研究无机物质之间化学反应的考虑，还可以将无机物质体系作为最底层微观系统。

对系统的结构进行多层次划分对弄清元素间的关系十分重要。因为元素间的关系是在子系统内部发生的，不同子系统内部的元素之间是通过子系统发生相互影响的，它们之间只存在间接关系。

当系统元素众多、结构复杂时，应当正确对系统分层讨论，这样有利于清晰系统内部各种复杂关系，因为很多时候系统内部元素之间的影响是间接的但是又是不可忽略的，若只在一个层次上定义系统，则为囫圇吞枣而必将引起混乱。

而且，各子系统所体现的内容并不一定相同，支配各个子系统内部元素间相互作用的关系的类型也并不一定相同。比如说如上例子中，0 层系统内部的反应器之间通过传质建立联系，以下系统内部通过生物化学过程建立联系。这个例子大体是按照宏观与微观上的尺度差异划分系统层次的，并不排除以其他方式划分系统层次。

子系统的定义也有助于分解问题规模，便于子系统优化和系统间工程优化。

1.3.3 系统的功用和定义方式

定义系统框架和划分或定义系统内部元素不仅取决于研究对象的客观属性，很大程度上还取决于人们的视角。而这与人把握系统时的目的和出发点有关，即系统的功用。

拿“城市”这个复杂系统举例。城市是人工与自然环境的复合生态系统，人的活动在其中占有重要地位，而城市系统可以从不同视角进行分析。从城市的服务功能上定义城市系统对象，可以将其视为交通职能子系统、城市水循环子系统以及城市社区、商业区、工业区子系统的组合。如果从经济关系上划分城市，以公民个体为元素所构成的企业或者经济实体被视为城市的子系统。其结合城市资源条件子系统，组成城市整体经济体有机整体。此又是一种城市系统的解剖方案。其实对城市的认知方式还有很多，这就说明了系统定义的多样性。

实际上，“城市”是什么并不十分重要，关键是研究者要拿“城市”做什么。比如说，为了合理配置城市的各种服务功能，优化城市的运转，则就应该将城市视为服务功能的组合。如为了优化城市的经济行为，则可以将城市定义为经济体系统来研究。在这种视角下甚至可以将市政府看做特殊的企业，其以改善资源利用和投资环境的付出为成本，以税收为收

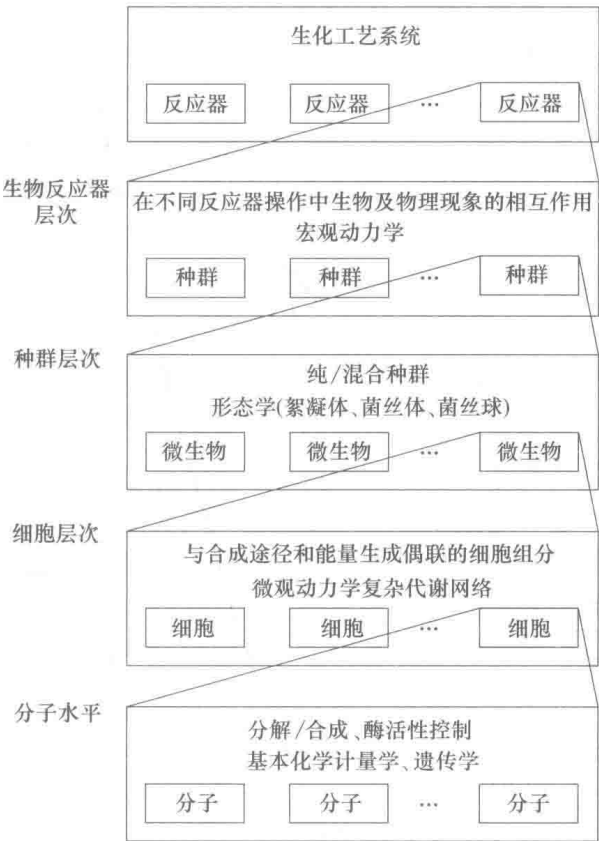


图 1.2 生物工艺过程系统层次示意图[2]

益，而被视为城市这一宏观经济体系统的最重要统筹关系。这并不是在说“政府是企业”，而是在承认政府的行政和管理职能的基础上，在运行方式上，不否认政府具备某种企业的特征。这是由研究对象的复杂性所决定的。

系统的定义方式取决于人们处理事物的功能视角，和其某方面的功能特征。回到现实功用上，系统的认识对应于系统的可操作性。虽然对对象认识的角度各有不同，但现实功用是认识和理论的落脚点。

1.3.4 环境科学的系统视角

不管在什么层次上认识事物，事物既可以被当做一个整体，也可以被化整为零。“划分”和“整合”的依据就是研究对象的功能特征和相互联系。具备共同特征的被认为是一类事物，联系紧密的一组事物被视为一个系统。这是研究者对客体的认知，如以上所举浅海生态系统的例子，以及在任何层次上和生物工艺系统及其子系统的例子等无不说明这一点。

有一种系统观叫“反应器”系统观或者“反应器”系统视角。在化工过程领域或者环境工程领域中，经常需要研究某一个反应器内部物质的转化细节，用于过程模拟和优化。比如吸附分离过程所使用到的固定床反应器、污水处理所使用到的沉降池或曝气池等。反应器是人造的反应转化装置，是一种相对简单的系统。物质的质量进入反应器内部能够受控地发生传递和转化，这种控制主要是保证质量的转化过程不至于受到无关物质侵入的干扰，不仅在质量上，这种相对的封闭性也可以体现在热量上，比如绝热容器。反应器是研究者所熟知的对象，自然地，研究者也会迁移地使用反应器的思想视角去类比思考和研究复杂体系内部的传递、转化现象和过程。比如对湖泊水质的研究，很多模型将湖泊视为一个巨大的“反应器”，相对地将体系“封闭”起来考虑。在这个前提下再去观察湖泊内部主要物质或所有物质的组成及其传递和转化关键问题。这里，湖泊好比一个鱼缸。更为复杂的是有关某地区大气质量的研究，研究者将这个地区空间范围视为一个“反应器”。虽然体系并不封闭，但是输入、输出体系的质量、动量甚至热量完全被认为是可探知甚至可测量的，剩下的就是观察在这个区域及空间范围内部物质的转化的细节了。

“反应器”系统有两个基本特征。其一，系统相对封闭而不确定性可控；其二，守恒律原理是系统的支配性原理，系统内部的传递或转化行为基本由质量、动量和能量的守恒律原理所支配。

环境科学领域的反应器系统观是一种简化。其将所有物质的输入或输出视为已知，认为不管系统多么复杂，其都是一个相对封闭的体系，内部的物质转化过程不会受到不确定因素的干扰，或干扰可以忽略。这种系统观，直接斩断了与主要观察对象联系稀松的其他对象与主体的牵连，排除外界干扰，将主要观察对象相对地封闭起来处理，能够抓住复杂问题的主要方面，而在环境科学的许多研究中被广泛使用。然而其适用的范围也是有限的，原因还是其“不确定性可控”的特点。如果某个湖泊的水体与地下水系相通，但是地下水体系的结构无从观察，处于未知，则关于此湖泊内物质的传递过程将存在明显的不确定性因素，传统的水质模型失效。另一种情况，对于较为封闭的湖泊，即便与其连通的河流的位置已知及其输入、输出的通量可测，当其底泥过于深厚时，传统的水质模型也将失效。

应该说，包括信息不明在内的各种不确定性有时难以彻底排除，但是传统的“反应器”视角下的系统模型发展较为成熟，也十分可靠。因此，这里仍然建议缩小讨论范围，以有限系统化的处理方式定义系统，而尽可能在信息明确的范围内研究关系和组成，在“反应器”

视角下用好经典的守恒律系统模型。对于随机因素或不确定因素影响显著的问题，建议用发展比较成熟的传统统计学理论和方法。

还有一种系统观叫“经济体”的系统视角。城市主要是人工生态系统，或者城市是企业 and 个体以及政府的合成，是一个清晰的经济体机构。其中各元素以价值关系建立联系，存在的运行规则可以是人依据最优化原理建立的。再有，污水处理厂是一系列工艺设备的集成，尽管当中每个设备可以看做是个反应器，但是如果要对污水处理的效益（效果）进行优化，则应该将整个污水处理体系视为“经济体”系统：整个污水处理系统的总效益（效果）由各个工艺单位的各自效益（效果）共同决定，虽然它们之间通过传质建立联系，但是支配系统的基本原理不是“反应器”的守恒律原理，而是总处理效益（效果）意义下的经济最优化原理。

以上举了几个例子实际上相对简单，尚可以“反应器”或“经济体”已知的系统视角理想化处理，找到其中的量化关系。而对于某些研究对象，却很难使用固定的量化方法去完整把握它，比如各类生态系统等等。实际上，使用系统的思维方法和观察视角的最终目的是要帮助研究者将问题清晰化而非复杂化。与其追求过于复杂的学科综合，不如回到个别具体学科内部。所以有限系统化、具体问题具体分析以及聚焦复杂对象关键问题十分重要。

1.4 环境系统的模型化

1.4.1 模型和模型方法

“模型”是个既通俗又晦涩的概念。研究者把环境风洞中的地形沙盘叫做模型，又把埋藏在文献中生僻难懂的某些数学公式称作“模型”。实际上，对它们使用共同的名字是恰当的。为了说明这个问题，下面以使用环境风洞的模拟方法研究某地区重气扩散过程的研究行为举个例子。

重气是一类密度高于大气的，有污染或有毒有害气体的总称，因为其密度大的特性，其一旦泄漏容易在地表形成爬流而不易消散，造成污染甚至伤及人群。重气在特殊地貌条件下的传播、扩散行为如何发生发展，并如何针对其在不同大气环境条件下的传播特征设计应急预案等相关问题，需要通过科学研究给出解答。为给出一个相对正确的答案和相对可靠的解决方案，需要针对泄漏发生的具体情境进行研究和讨论。

设定这样一个情境，如在某山地城市发生液化气泄漏事故，重气将怎样传播、扩散。但如果针对此问题设计实施真实的场地实验，将造成重大环境污染事故，后果将不堪设想，而使得事件性质完全背离科学研究行为。所以研究者愿意选择使用模型，在实验室和计算机里完成整个情境的模拟。这样做甚至可以重复演绎情境过程的发生，或者模拟各种不同情境的污染过程。这是一种安全、相对客观并且廉价和灵活的研究方式。

为此研究者需要设计制作一系列模型。为了最大限度地达到模拟情境与真实情境的相似，研究者首先根据这个城市的真实地形地貌（如图 1.3 所示）建立了一个木制的几何模型（如图 1.4 所示）。把真实地形按比例缩小到实验室中来而实现模拟情境在几何上的相似。进一步，研究者还需要把环境风场“搬”到实验室中来，并放到几何模型上。这就是要实现在地形地貌相似的基础上做到风场的相似。

实际上，环境风场的完全相似是做不到的，但是边界层大气运动的基本规律是可以把握