



科学方法大系

环境科学研究方法丛书

环境系统工程方法

曾维华 霍 竹 刘静玲 等 编著



科学出版社



科学方法大系

环境科学研究方法丛书

环境系统工程方法

曾维华 霍 竹 刘静玲 等 编著

科学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统收集、归纳、整理了现有的常用环境系统工程方法,包括环境系统评价方法、环境系统模拟仿真方法、环境系统规划方法、环境系统决策方法、环境系统设计方法、环境系统管理方法等。此外,针对每一种方法,本书均提供了典型的案例,并对其进行分析总结,以加深读者对这些方法的理解,增强解决实际问题的能力。

本书可作为环境及其相关专业本科生、研究生的教材,也可作为从事环境领域相关工作人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

环境系统工程方法 / 曾维华, 霍竹, 刘静玲等编著. —北京: 科学出版社, 2011

(环境科学研究方法丛书)

ISBN 978-7-03-030887-0

I. 环… II. ①曾… ②霍… ③刘… III. 环境系统工程—研究方法
IV. X192-3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 073456 号

责任编辑: 李 敏 王 倩 王 晓 光 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 黄华斌

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 8 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2011 年 8 月第一次印刷 印张: 25 1/2 插页: 2

印数: 1—2 000 字数: 500 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《环境科学研究方法》丛书编委会

主 编 杨志峰
副 主 编 彭斯震 刘静玲
编 委 (按姓氏笔画排序)
 刘静玲 毕 军 杨志峰
 彭斯震 曾维华 霍 竹

《环境系统工程方法》编委会

主 笔 曾维华
副 主 笔 彭斯震 霍 竹 刘静玲
成 员 (按姓氏笔画排序)
 王 妍 王 涛 石巍方
 刘恒辰 刘静玲 许乃中
 吴 波 时京京 陈 彬
 彭斯震 曾维华 霍 竹
审 校 霍 竹 刘静玲
排 版 时京京

前 言

环境科学与工程是一门新兴的、综合性很强的交叉学科，它不仅涉及自然科学与工程技术，而且还涉及经济学、社会学和法学等社会科学领域。与其他基础科学不同，环境科学与工程是一门问题导向的学科，是在环境问题日益严重的情况下产生和发展起来的。

环境科学与工程的研究对象“环境”指围绕着人群的空间，以及其中可以直接、间接影响人类生存和发展的各种天然的和经过人工改造过的自然因素的总体。人及其周边环境组成一个复杂巨系统，整个系统的作用和功能不是系统内各个子系统的简单相加，而是各子系统和各组成要素之间相互关联、相互作用，具有自我调节的能力，保持系统稳定和平衡，形成复杂的系统结构，并由此对外表现某种功能。环境科学与工程研究的根本目的就在于协调这一复杂巨系统各子系统之间的关系，使之协调、持续、健康发展。

随着人们对环境问题的关注程度与认识不断深入，环境科学与工程飞速发展，所涉及的研究范畴不断扩大，不断与相关学科交叉、渗透与融合，所采用的研究方法不断丰富、拓展，日趋完善。尽管如此，环境科学与工程仍处于成长期，尚未形成自己一整套的研究方法体系，尽管环境科学与工程有很多分支领域，但大多是为解决环境问题而与传统基础学科嫁接而发展起来的，其理论研究方法与其他相关学科有着错综复杂的联系，更主要的是利用传统学科的理论方法解决环境问题。为了更好地解决环境污染与生态破坏问题，树立科学的发展观，全面推进可持续发展战略的实施，建设环境友好型和谐社会，推动环境科学与工程自主创新方法工作的开展，急需对环境科学与工程及其分支学科进行全面梳理，归纳总结，全面构建环境科学与工程自己的理论与方法体系，提炼具有指导性的方法体系，以提升环境科学与工程学科的研究与发展水平。

环境科学与工程是一门问题导向的综合性交叉学科，尽管其学科分支领域众



多,但无论是环境科学还是环境工程,都是为了解决某些问题而逐渐发展起来的;因此,环境科学与工程有其共性研究思路与方法。首先是环境问题的甄别,这就需要环境系统评价方法;其次是研究环境系统演化规律,这就需要环境系统模拟仿真方法;再次是确保环境系统优化设计,以最小的费用确保环境系统协调、持续、健康发展,这就需要环境系统规划方法;环境系统优化方案提出后,需要提供给决策者决策,筛选最终实施的决策方案,这就需要环境系统决策方法;环境系统决策方案一旦提出,就要付诸实施,需要开展环境系统设计;最后,还需要对设计开发出的环境系统进行环境系统管理,以确保得到的最佳环境系统方案顺利实施。

《环境系统工程方法》一书的目的就在于为了确保由人及其周边环境组成的复杂巨系统的协调、持续、健康发展,以这一复杂巨系统为研究对象,以系统科学思想为指导,系统工程方法为工具,结合环境科学研究与环境工程设计的具体特点与需求,将系统工程方法应用于环境科学研究与环境工程设计的具体实践。

环境系统工程就是以人及其周边环境组成的复杂巨系统为研究对象,组织协调这一复杂巨系统内部各子系统之间的活动,使其各子系统为实现整体目标发挥适当作用,实现系统整体目标最优化的一门特殊的工程技术。环境系统工程为环境科学研究与环境工程设计,从理论思想上提供指导,在技术方法上提供工具。由此可见,环境系统工程本身就是为环境科学提供技术方法的学科。本书在整合以往环境系统工程教学科研成果基础上,系统归纳总结环境系统工程技术方法,形成一整套支撑环境科学创新的环境系统工程方法体系。

《环境系统工程方法》一书系统收集、归纳、总结了现有常用的环境系统工程方法,并给出了相应的案例分析与总结评述。按环境系统工程的问题甄别、系统模拟、系统规划、系统决策、系统设计与系统管理的技术路线,全书共分六篇。第一篇是环境系统评价方法,具体包括生态足迹(由王妍负责编写)、烟分析(由王涛,陈彬负责编写)、能值分析(由王妍负责编写)、生命周期评价(由许乃中负责编写);第二篇是环境系统模拟仿真方法,具体包括环境系统模拟模型(由曾维华负责编写)、环境系统动力学模型(由王妍负责编写)与环境系统可视化与虚拟现实技术(由石巍方负责编写);第三篇是环境系统规划方法,具体包括情景分析方法(由曾维华负责编写)、环境系统优化方法(由刘恒

辰负责编写)；第四篇是环境系统决策方法，具体包括环境系统决策一般方法(由曾维华负责编写)、费用效益分析(由王涛、曾维华负责编写)；第五篇是环境系统设计方法，具体包括生态设计方法(由许乃中负责编写)、计算机支持下的协同设计(由吴波、曾维华负责编写)；第六篇是环境系统管理方法，具体包括项目环境影响评价(由刘恒辰负责编写)、战略环境评价(由曾维华负责编写)、环境风险评价与管理(由石巍方负责编写)。全书统稿与校对工作由曾维华、刘静玲、彭斯震、霍竹和时京京共同完成。

本书是作者在北京师范大学环境学院进行多年的教学和科研积累的基础上提炼完成的，并得到科学技术部创新方法工作专项项目(2008IM020700)、“十一五”国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07633-05-06与2009ZX07212-002)的资助；同时，感谢21世纪议程管理中心副主任周元教授，以及科学出版社李敏编辑在本书出版过程中给予的大力支持；最后，本书在编写过程中参阅了大量文献，部分案例直接引用文献的研究成果，在此对所参阅文献的作者一并表示诚挚的谢意！

本书侧重环境系统工程常用的一般方法，是一本工具书，仅供从事环境科学研究与环境工程设计的学者、大专院校与科研单位的老师与学生参考。由于编者水平有限，书中不当之处敬请读者批评指正。

编 者
2011年1月于北京

目 录

前言

第一篇 环境系统评价方法

第 1 章 生态足迹——一种度量系统可持续发展状态的方法	3
1.1 引言	3
1.2 生态足迹模型的计算方法介绍	10
1.3 案例分析——以博鳌特别规划区的可持续发展分析为例	13
1.4 讨论与总结	19
第 2 章 熵分析	22
2.1 引言	22
2.2 方法介绍	24
2.3 案例分析	33
2.4 讨论和总结	44
第 3 章 能值分析	45
3.1 引言	45
3.2 能值分析方法介绍	48
3.3 案例分析——以辽宁循环经济发展水平能值分析为例	55
3.4 讨论与总结	60
第 4 章 生命周期评价	63
4.1 引言	63
4.2 方法介绍	71
4.3 案例分析	94
4.4 讨论与总结	100

第二篇 环境系统模拟仿真方法

第 5 章 环境系统模拟模型	105
5.1 引言	105

5.2	环境系统模拟分类及步骤	106
5.3	案例分析——河流水环境质量模拟	110
5.4	案例分析——ASM 3 及其在城市污水生物处理系统中的应用	119
5.5	讨论与总结	129
第 6 章	环境系统动力学模型	131
6.1	引言	131
6.2	环境系统动力学模拟方法概要	135
6.3	案例分析——以北京市通州区城市水代谢系统动态仿真研究为例	142
6.4	讨论与总结	150
第 7 章	环境系统可视化与虚拟现实技术	151
7.1	引言	151
7.2	方法介绍	154
7.3	案例分析	164
7.4	讨论与总结	167

第三篇 环境系统规划方法

第 8 章	情景分析方法	171
8.1	引言	171
8.2	情景分析理论基础	172
8.3	案例分析——水污染控制规划情景分析	175
8.4	案例分析——环境承载力约束下的区域可持续发展情景分析	181
8.5	讨论与总结	195
第 9 章	环境系统优化方法	197
9.1	引言	197
9.2	系统优化方法概要	198
9.3	案例分析——区域环境承载力优化模型	210
9.4	讨论与总结	216

第四篇 环境系统决策方法

第 10 章	环境系统决策一般方法	219
10.1	引言	219
10.2	环境系统决策的基本理论	220
10.3	常用的单目标环境系统决策技术方法	225

10.4	多目标环境系统决策分析技术	232
10.5	案例分析	240
10.6	讨论与总结	243
第 11 章	费用效益分析	245
11.1	费用效益分析原理	246
11.2	环境费用效益分析评价标准	251
11.3	环境费用效益分析的步骤	253
11.4	环境费用效益分析技术方法	256
11.5	案例分析	261
11.6	讨论与总结	266

第五篇 环境系统设计方法

第 12 章	生态设计方法	271
12.1	引言	271
12.2	生态设计要素与方法	279
12.3	案例分析	284
12.4	讨论与总结	293
第 13 章	计算机支持下的协同设计	294
13.1	引言	294
13.2	计算机支持下的协同设计体系	297
13.3	案例分析——计算机支持下的协同设计在调水工程中的应用	308
13.4	讨论与总结	310

第六篇 环境系统管理方法

第 14 章	项目环境影响评价	313
14.1	引言	313
14.2	项目环境影响评价技术路线与方法	315
14.3	案例分析	324
14.4	讨论与总结	330
第 15 章	战略环境评价	332
15.1	引言	332
15.2	战略环境评价理论与方法	334



15.3	案例分析	346
15.4	结论与讨论	370
第 16 章	环境风险评价与管理	372
16.1	引言	372
16.2	环境风险评价与管理概要	374
16.3	案例	385
16.4	讨论与总结	388
参考文献		389

第一篇|环境系统评价 方法



第1章 生态足迹——一种度量系统

可持续发展状态的方法

1.1 引言

1.1.1 生态足迹的概念及其原理

自可持续发展的概念提出以来，定量测度可持续发展便成为重要的研究内容之一。国际上先后出现了一些直观的、易于操作的可持续指标体系及其定量评价方法。而生态足迹分析（ecological footprint analysis）方法就是近年来发展的测度生态可持续发展的定量方法，它同时也是度量人类活动对生态系统的压力和影响的一条新途径。

3

1. 基本概念

1) 生态足迹

William Rees 曾将生态足迹形象地比喻为“一只负载着人类与人类所创造的城市、工厂……的巨脚踏在地球上留下的脚印”（Rees, 1992）（图 1-1），如果当地球所能提供的土地面积容不下这只“巨脚”时，其上的城市、工厂就会失去平衡；而这种情况长久下去，最终会导致人类文明的坠落和崩溃。

生态足迹的设计思路为：人类要维持生存，必须消费各种产品、资源和服务，人类的每一项最终消费的量都可以追溯到提供生产该消



图 1-1 生态脚印



费所需的原始物质和能量的生态生产性土地的面积上。因此，人类系统所有消费理论上都可以折算成相应的生态生产性土地的面积，即人类的生态足迹。我们可以这样理解生态足迹的概念：任何已知人口（个人、城市、国家、社区）的生态足迹是生产相应人口所消费的所有资源和消纳所产生的废物所需要的生态生产性土地面积（包括陆地和水域），如图 1-2 所示。

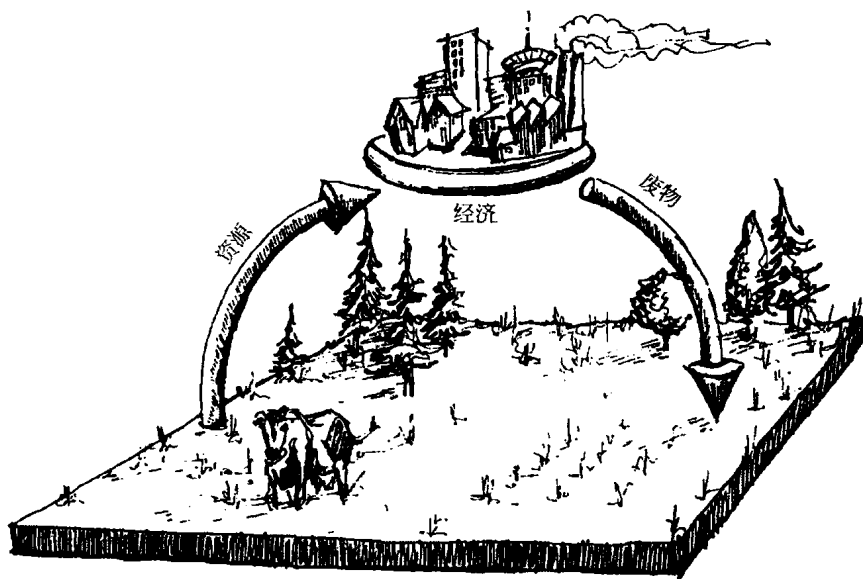


图 1-2 生态足迹的描述示意图

生态足迹形象化地反映了人类对地球环境的影响，又包含了可持续性机制。其内涵表现在：它测量了人类对自然生态环境的需求与自然所能提供这种物质流所必需的生态生产性土地面积，并同国家或区域范围所能提供的这种生态生产性土地面积进行比较；由此为分析一个国家或区域的生产消费活动是否处于当地生态承载力范围内提供了定量的判断依据。

2) 生态生产性土地 (ecological productive land)

生态足迹的定义中提出了生态生产性土地这一概念。所谓生态生产也称生物生产，是指生态系统中的生物从外界环境中吸收生命过程所必需的物质和能量转化为新的物质，从而实现物质和能量的积累；在生态足迹理论中，自然环境消纳污染物的作用也被作为生态生产的一种。生态生产性土地就是指具有生态生产能力的土地或水体（表 1-1），它是生态足迹分析法中各类自然资本的统一度量基础。与各种繁杂的自然资本项目相比，各类土地之间更容易建立等价关系，因此

利用土地面积衡量自然资本简化了对自然资本的统计，使其计算更具可操作性。这些生态生产性土地可以分为6大类：耕地、草地、森林、化石能源用地、建设用地和水域。

表 1-1 地球上具有生态生产力的土地和海洋

分类	总面积/10 亿 hm^2	人均面积/ ($\text{hm}^2/\text{人}$)
1. 可耕地（占陆地面积 10%）	1.45	0.24
2. 建筑用地（占陆地面积 2%）	0.3	0.06
3. 牧地（占陆地面积 23%）	3.36	0.56
4. 林地（占陆地面积 33%）	5.12	0.85
5. 具有生态生产力的海洋（占海域 8%）	2.9	0.4

（1）耕地（cropland）。种植农作物用作食物、动物饲料、纺织品和油料都需要可耕地。从生态角度来看，可耕地是所有生态生产性土地中生产力最大的一类，聚积着人类可利用的大部分生物量。其生态生产力用单位面积产量表示。

（2）草地（pasture）。草地对人类的贡献主要是提供放牧。其生态生产力可以通过单位面积承载的牛羊数及相应的奶、肉产量计算得到。

（3）森林（forest）。森林是可产出林产品的人造林或天然林。目前全球共有约 39 亿公顷的可用林地。目前，除了少数偏远的、难以进入的密林地区未统计计算外，大多数森林的生态生产力并不高。其生态生产力主要是提供木材及相关林副产品的量。

（4）化石能源用地（fossil fuel land）。化石能源用地的计算方法有：①替代法，计算提供化石燃料替代物甲醇和乙醇所占用的土地面积来获得化石能源用地；② CO_2 吸收法，计算吸收化石燃料燃烧排放的 CO_2 所需要的森林面积；③计算以化石燃料枯竭的速率重建资源资产替代的形式所需要的土地面积。由于方法②较为简便，目前多采用该方法来计算化石能源用地，即计算吸收化石燃料燃烧排放的 CO_2 所需要的森林面积。

（5）建设用地（built-up area）。建设用地包括各类人居设施及道路等所占用的土地。由于人类主要聚居在土壤最肥沃的土地上，建设用地的挤占造成了全球生态能力无法挽回的损失。

（6）水域（water area）。水域包括非淡水（海洋、盐水湖泊等）和淡水（河流、淡水湖泊等）。水域主要为人类提供鱼类等水产品，因此其生态生产力主要是指鱼类等水产品的单位面积产量。

3) 生态赤字 (ecological deficit) 与生态盈余 (ecological reserve)

生态赤字与生态盈余是生态足迹分析方法中衡量可持续发展的重要指标。在生态足迹分析中, 我们将一个地区所能提供的人类生态生产性土地面积定义为该地区的生态承载力 (biocapacity), 以“全球公顷” (gha) 来表示, 表征在当前的管理水平和开采技术条件下, 生态系统生产可利用自然资本、消纳人类排放的废物的能力, 即该地区为当地人口提供生物产品和消纳废弃物的能力。

将生态足迹与生态承载力相减, 以其差值判断生态系统的状态和其可持续发展状况。生态赤字即差值为正, 表示该地区人均占用资源量超过了生态承载力; 生态盈余即差值为负, 表示人均占用资源量仍在生态承载力允许的范围内。Wackernagel Mathis 1997 年的研究结果显示, 全球绝大部分国家处于生态赤字状态, 人类发展远离了可持续性 (Wackernagel et al., 1997, 1999) (表 1-2)。

表 1-2 全球生态足迹 (单位: $\text{hm}^2/\text{人}$)

年份	人均生态足迹	人均生态承载力	人均生态赤字
1993	2.8	2.1	0.7
1995	1.8	1.5	0.3
1997	2.3	1.8	0.5

2. 基本假设

生态足迹理论的基本假设是理论构建和应用的基础。Wackernagel 将生态足迹理论的基本假设归纳为以下 6 项。

- (1) 人们消费的资源 and 排放的废物大部分都是可追踪的;
- (2) 大部分资源和废物流 (resource and waste flows) 可以折算成相应的生态生产性土地面积, 不能折算的资源 and 废物流不纳入计算范围;
- (3) 不同类型的土地可根据其生态生产力按一定比例折算成通用的单位面积——全球公顷, 即 1 公顷具有世界平均生态生产力的土地;
- (4) 由于等价因子的调整, 不同年份的全球公顷都表示一定量的生态生产力, 因此可对不同年份的生态足迹和生态承载力进行求和;
- (5) 人类对自然资本的需求 (生态足迹) 和自然资本的供给 (生态承载力) 都以全球公顷为计量单位, 因此可直接比较;
- (6) 当自然资本需求大于生态系统的再生能力时, 生态生产性土地需求大于供给, 从而出现生态赤字。