

环境系统最优化

[美] D.A.海思 著

中国环境科学出版社

环境系统最优化

〔美〕D. A. 海思 著

袁铭道 李民 译

中国环境科学出版社

内 容 简 介

本书介绍了系统分析方法在环境管理中的应用。第一、二两章阐述了系统分析的基本思想和一般方法；在以后各章中，通过典型实例，介绍了环境问题的数学模拟和优化技术，其中包括搜索技术、线性规划、整数规划、动态规划等。举例涉及水、气污染控制、固体废弃物管理、土地规划、能源分配等许多方面。书中还讨论了费用效益分析、多目标规划、灵敏度分析、技术经济分析等问题。

本书可供环境管理工作、系统分析工作者及有关院校师生参考。

Douglas A. Haith

ENVIRONMENTAL SYSTEMS OPTIMIZATION

John Wiley & Sons 1982

环境系统最优化

【美】D.A. 海思 著

袁铭道 季民 译

责任编辑 王晓民

中国环境科学出版社

北京崇文区东兴隆街69号

轻工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1987年10月第一版 开本787×1092 1/32

1987年10月第一次印刷 印张9 3/4

印数0001—8 000 字数219千字

ISBN 7-80010-058-8/X0058

统一书号：13239·0116

定价：2.30 元

序 言

有关土地、水、大气和能源的管理问题，历来都是很棘手的。包括污染控制和资源分配的环境管理，由于其复杂性，往往无法对其进行合理的分析。环境决策的政治因素是造成这种情况的部分原因，而更主要的是环境系统内部存在着错综复杂的关系。污染物在随水或大气从一地迁移到另一地的过程中，会发生化学变化。土地的某一种用途，可能限制了土地的其它用途。制定能源规划，必须处理好复杂的供需关系。要了解污染控制和资源管理各种决策的效果也是很困难的。从许多方案中确定符合管理目标的最佳方案，经常几乎不可能。

然而自二次世界大战以来，逐渐形成了一种解决管理问题的方法，称之为系统分析。实践已经证明，它对解决复杂的管理问题非常有用。系统分析的出现，使对环境问题进行管理成为现实，而且在当前的应用中已颇有成效。其中最有成效的是环境系统的数学模拟，以及用最优化技术进行环境管理决策。

本书介绍系统分析的应用，特别是环境管理的数学模拟和最优化技术。它适合于大学生和从事环境工作的人员使用，也适用于与解决污染控制和资源分配问题有关的工程师、生物学家、经济学家和规划工作者。

本书以两个主题为重点。第一，用数学模型把环境问题以数学关系表示，籍此评价各种管理方案的效果。第二，应用搜索技术、线性规划、动态规划和整数规划等最优化技

术，确定各种管理方案的优劣。书中列举了很多例子，既充分地讨论了水和大气污染控制，以及固体废弃物管理应用系统分析的问题，也涉及到诸如废物土地处置、非点源污染、土地利用规划、能源规划和多目标规划等新的应用领域。为避免讨论不切实际的问题，书中有两章对实际环境问题进行了深入的分析研究。

系统分析的基本原理比较简单，只要有大学一年级的数学基础就可以掌握。数学上的证明都采用直观、图解和简单代数的方法。对理解书中内容，具备编制计算机程序的能力不是必须先决条件。也不一定要有环境管理方面的经验，或学过有关的课程，不过这些经验对理解有些例子是有用的。

本书是根据康奈尔大学高年级的讲义编写而成。这门课程虽然被列为某些专业的环境主修课，但是也吸引了很多想了解系统分析的学生。本书的全部或部分内容可用于其它领域。书中各章内容的编写，使其尽可能地能单独使用，便于作为参考材料。

很多学者对本书作出了贡献。J.R.库克(J.R.Cooke)、R.B.弗里(R.B.Furry)、C.D.盖茨(C.D.Gates)、D.P.劳克斯(D.P.Loucks)、J.R.斯特丁格(J.R.Stedinger)和M.F.沃尔特(M.F.Walter)审阅了初稿，在逻辑推理和数学上作了校正，并提出了许多宝贵意见。

D.A.海恩

目 录

第一章 环境系统分析	(1)
一、费用-效益分析概论	(3)
二、系统分析应用举例	(8)
本章小结	(14)
第二章 数学模拟和最优化	(16)
一、废水管理问题的数学模拟	(16)
二、系统分析的总结	(25)
三、农药管理问题的数学模拟	(28)
本章小结	(39)
第三章 应用：城市污水处理规划的最优化模型	(40)
一、问题的提出	(40)
二、技术背景	(42)
三、系统分析	(51)
本章小结	(63)
第四章 两种最优化算法介绍	(64)
一、拉格朗日乘子法	(65)
二、序贯寻优法	(73)
本章小结	(82)
第五章 线性规划模型	(84)
一、二维线性规划举例	(85)
二、单纯形法	(90)
三、线性规划问题的一般特征	(95)
四、对偶线性规划模型	(104)
五、线性规划在大气污染控制中的应用	(114)
六、大气质量管理通用线性规划模型	(127)

本章小结.....	(134)
第六章 应用：农业非点源污染的控制	(135)
一、非点源水污染.....	(135)
二、问题的提出.....	(137)
三、系统分析.....	(141)
四、应用.....	(149)
本章小结.....	(160)
第七章 可分离规划和整数规划.....	(162)
一、可分离规划.....	(162)
二、整数线性规划.....	(184)
本章小结.....	(207)
第八章 运输模型.....	(209)
一、运输模型用于能源分配问题.....	(212)
二、指派问题.....	(227)
本章小结.....	(233)
第九章 动态规划模型	(235)
一、动态规划在土地利用规划中的应用.....	(236)
二、动态规划的表示法.....	(243)
三、城市污水除磷的例子.....	(250)
四、一般的一维动态规划.....	(262)
五、库存问题.....	(264)
六、动态规划在大气污染控制中的应用.....	(272)
七、正向动态规划.....	(280)
本章小结.....	(285)
第十章 时间序列最优化.....	(287)
一、未来目标的贴现.....	(287)
二、未来货币收入和支出的评价.....	(290)
三、公共投资贴现率的选择.....	(296)
四、生产能力扩大问题.....	(298)
本章小结.....	(306)

第一章 环境系统分析

环境管理是一项复杂而且具有风险性的任务。它包括与人类活动密切相关的土地、水、大气和能源等方面的问题。环境管理的主要困难在于环境问题是各有关因素综合作用造成的。例如污水排入河流造成的水污染，就牵涉到众多的因素：污染源、污水管渠、处理工艺、排放口的位置和方式、污染物在河流中的迁移，以及污染物对生物和人类用水的影响等。以上每一个组分，虽然能单独地分析，而且往往也是这样做的，然而水污染问题却是水污染系统中各个因素综合作用的结果。

把环境问题作为一个系统，有许多显著的优点，这样做可以从整体上考虑问题，找出最有效的控制对策。例如在解决污水排放问题时，对削减污染源排放量、选择处理方法和排放口位置等进行综合考虑，要比单独改进处理方法更为有效，并有可能更加经济。以系统的观点解决环境质量问题，为取得可行的控制方案，以及制定有效的综合性管理对策，开辟了广阔的途径。

系统是相互作用的事件的集合，对这个集合的研究就叫作系统分析。从计算机科学到社会科学，系统分析在很多学科中得到了广泛的应用。通常用系统分析方法解决问题，一般包括三个步骤：

(1) 确定研究的系统和目标，

(2) 产生和评价满足目标要求的多种方案;

(3) 选择一个方案。

这几个步骤显然是一般的规定。通过一些改进,可以使这种方法具有更好的性能。第一是系统分析强调定量分析。虽然它也可以用定性的、描述性的形式,但是用数学形式能得出最有说服力的结果。如果系统的组成部分、目标和决策方案以数学形式描述,就便于系统分析者交换相互的分析结果,最终的使用者更容易理解问题的解。定量分析虽然并不能完全取消主观判断,但是能防止出现模糊不清的结果。

第二个改进是由定量决策引出的。除最简单的系统之外,各组分之间通常存在着多种组合,形成不同的决策方案。这些组分之间互相作用的数值计算是冗长无味的簿记过程,完全可以利用数学模型来完成。模型是对实际系统的近似或抽象的描述,它包含系统目标、组分之间的互相作用和管理决策方案的数学表达式。数学模型是一种重要的实验工具,分析者可以通过改变模型的参数,利用模型的输出,预测实际系统的变化。数学模型有助于迅速地产生和评价解决问题的不同方案。

最后一个改进是引入一些条件,使模型得出所需形式的解,这些条件是提高效率所必需的。大多数数学模型能够评价无限多的方案,然而分析者需要的是能满足目标的最好方案,这种方案可以通过采用最优化技术求得。最优化技术与系统的数学模型相结合,形成最优化模型。

本书论述环境问题的系统分析,或者说系统分析方法在环境管理中的应用。书中强调系统分析的定量化概念,特别是采用最优化模型解决环境问题。这并不意味着其它形式的系统分析方法对环境管理没有用处,也不是说最优化模型对环境问题总能产生理想的解。不过应用最优化模型的成效已

经表明，这种方法能够提高环境工程师、规划工作者和科学家分析问题的能力。

一、费用-效益分析概论

环境管理要依据目标或准则，确定其应采用的方案。一个总的目标是净社会效益最大。用货币形式定量地反映效益，是费用-效益分析的主要任务。费用-效益分析有两个关键部分，其一是资源分配的思想，把环境要素（水、大气、土地、能量等）当作改善社会福利的资源。其二是社会会计的概念，所有与环境问题有关的资源使用者，都要确定其费用和效益。下面通过水污染控制问题的例子（见图1-1），介绍费用-效益分析。

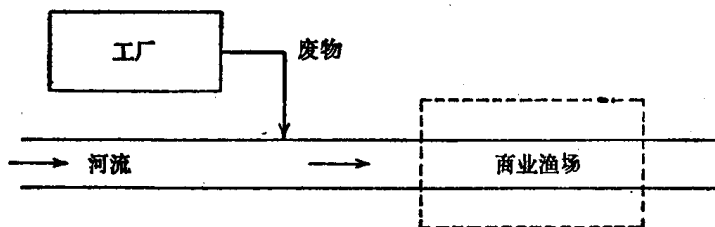


图 1-1 水污染问题示意图

如图 1-1 所示，位于河流上游的工厂有毒废水排入河流，影响下游商业渔场的捕捞量。假定只有工厂和渔场使用这段河流，由于废水排放造成的后果，是一个经济客体(ext-ernality)的例子。经济客体是一个经济单位产生的费用或效益，由其它经济单位承担。工厂排放废水引起的费用，是由渔场而不是工厂承担的。这部分费用对工厂收支帐目来说是个“外部”量。客体概念包含着不公平的现象，因为渔场不应该支付工厂排放废水引起的费用。然而公平往往是模棱两

可的。再举一个例子，假如有个富有者在大城市市区附近有一块地皮，沿着公路的地皮为林带和丘陵地，很多路过者（驾驶汽车的、骑自行车的、步行的）领略到在大城市中心区所没有的乡村自然景色，因此而感到心情舒畅。这块地皮就是一个客体，它为路过者提供了无偿的效益。如讲公平的话，这块地皮的主人应该从提供的效益中获得补偿。这个客体似乎没有废水排放那样明显，可是两者是类似的。在废水排放问题中，一个单位损害了环境资源，并且没有补偿给其它使用者。而自然景色客体却是由一个单位无偿的改善了环境资源，为其它使用者提供效益。

现在回到图 1-1 的例子，来讨论它的可能解是什么？它有两个极端解：任意排放或完全禁止排放。虽然这两个解都有缺点，但也不是毫无价值。任意排放方案的部分依据是，认为污染物是人类活动中无法避免的，加上污染物总得有个去处，排入河流就成为合乎逻辑的处置方法。况且人们早已知道，环境有一定的自净能力，若河水中有充足的氧气，水中很多有机物就能够迅速地被微生物氧化成二氧化碳和水。污染物在河水中的自净作用，可看作是对环境资源有价值的利用。然而一条河流的自净容量是有限的，过多的废水排入河中，就不能被净化，至少达不到预期水质要求。当河水中的氧被耗尽时，河流变成了腐败的，并且有恶臭味的下水道。这时候有机污染物可能仍然在被降解，但是大多数人都不同意这种状况。同样，水中有毒物质可能会通过水生食物链，最终毁灭鱼类和其他野生动物，或者危害人类的食物源。

另一个极端方案是完全禁止废水排放。采用这个方案，河流可能恢复到自然状态（未被污染前）。这个解的优点不那么明显，不过可以肯定，洁净的水和保护野生动物等方面

都为社会所喜爱。但是禁止废水排放，意味着承认这样一个前提，即这条河流用作渔场比用来净化污水有更大的使用价值。当然捕鱼也是对河流自然状态的干扰，也可以有禁止捕鱼的方案。在这种情况下，河流这个环境资源就没有使用者了。其它使用者，如为了体育活动而来河上钓鱼、划船和游泳的人会相继出现，与渔场情况相似，新的使用者在某种程度上也干扰了河流的自然状态。禁止废水排放的方案，不是都不使用河流，就是赞成某些方面的使用。在后一种情况下，要判断各种用途的使用价值，则引出了解决水污染问题的方法，称之为费用-效益分析。

费用-效益分析方法认为河流是个资源，应该最有效地加以利用。对废水排放来说，需要检验河流的两个使用者的影响，并用货币形式反映。假定工厂废水不经处理排放，则工厂不支出处理费用。如果对废水进行处理，最低处理费用是50000美元。渔场目前的收益为10000美元。据估计，若废水不往河水中排放，渔场的收益可提高到30000美元。根据这个任意排放方案，工厂获得50000美元效益，渔场付出了20000美元费用，净效益为30000美元。相反地，如果禁止废水排放，那么也就无工厂的效益和渔场的费用可言，不产生净效益。以上分析的结论是，把河流既用来接纳废水又作为渔场，比只把河流作为渔场使用价值更大。当然也可能存在更好的方案，例如工厂花费10000美元，使部分污染物不排入河流，可使渔场的收益提高到25000美元，则净效益为 $(50000 - 10000) - (30000 - 25000) = 35000$ 美元。应该对每一个可能的方案进行类似的评价，最后选择净效益最大，即河流资源使用价值最大的方案。

费用-效益分析是所有受不同环境决策影响的经济单位的货币费用和效益的集合。它是环境资源经济价值的指标。

由于许多原因，这个指标是不完善的，最主要的缺点是它忽视了费用效益分配的社会利益。如果渔场属于地方或少数民族团体，政府正在扶持它们发展经济，那么渔场损失 20000 美元就可能比工厂花费 50000 美元更为重要。很清楚，这里存在社会目标问题，而这个目标在费用-效益分析中得不到充分考虑，因而净效益准则很少被用作选择环境决策方案的唯一方法。然而它毕竟还是环境管理的一个主要工具，因为它能够以定量（货币）形式，计算出环境污染控制带来的效益和损失。此外，它可以确定不同污染控制方案对经济的影响。

费用-效益分析为征收“排污费”提供了理论根据。排污费的实质是利用环境容量的排放者支付的“使用价格”或“使用费”。排污费应该等于机会成本，或等于最有效地使用环境资源的价值。在工厂与渔场的例子中，机会成本为 20000 美元，即渔场所损失的收益。要注意到收排污费并不一定能够削减污染，本例中对工厂来说，只要排污费少于 50000 美元，它就有可能继续排放废水。排污费的目的是要使环境污染造成对外部的影响，在内部加以考虑，即迫使废水排放者考虑由于污染对外部造成的费用。

把费用-效益分析应用于实际问题，还存在其它方面的困难。如在本例中，河流不作为渔场，而是公共公园的组成部分，人们在这段河流上划船、游泳、钓鱼和观光等等。假设废水排放影响了这些活动，为了应用费用-效益分析，必须确定废水排放给使用者带来的货币费用（或效益上的损失）。因为个体使用者一般不会去计算他们娱乐活动的费用与收益，那么要估计作为公园的河流的使用价值就极其困难，而没有这样的估计，就不能计算污染控制方案的净效益。

上述问题可以通过规定环境质量标准来解决，标准以法

律或法规形式，对可监测的项目规定环境资源允许的最低质量要求。在本例中的水质标准，即是公园河流中有毒化合物的最大容许浓度，这意味着工厂必须把有毒物质的排放量，削减到能够达到河流的水质标准。通过政治程序建立的环境标准，能够协调环境资源使用者之间的关系。

环境质量标准也必须考虑社会对效益和费用分配的意愿。例如在工厂与渔场的例子中，若政府支持商业渔场发展，那么水质标准可能以影响鱼死亡率的参数为依据。一旦确定了标准，则可以计算达到标准的各种管理方案的净效益，从而选择净效益最大的方案。由此可知，环境标准是弥补费用-效益分析缺陷的一种方法。

如果能建立污染物排放与环境质量参数之间的因果关系，便可以应用环境质量标准。但这种关系通常不易确定，因为污染物排放到环境，要经历物理、化学和生物变化。假如公园河流上游有许多废水排放者，如何控制每个排放者，以满足水质标准要求，是非常困难的。在这种情况下，有必要引用排放标准，排放标准大体上相同地限制每个排放者的排放量和排放特性。如果排放水质达到这些标准，则认为河流水质会得到改善。可是这种改善在经济上不一定合理，例如只控制紧靠公园的主要排放者，比控制上游所有排放者更为经济，而对水质的改善可能是同样的。

排放标准有两个显著优点，即管理方便和公平。水污染控制规划的管理费用大、困难多。通过取样分析，能较容易地监测排放的污水是否达到排放标准，当超过标准时，只要对超标污染物增加去除量，就能消除超标现象。虽然也可以通过监测，确定河流水质是否达到环境标准，但是不易纠正排放者的超标现象，因为必须确定每一个超标排放者的相对贡献。同时排放标准对所有排放者都是公平的，特别是在对

每一个排放者制定统一标准的情况下。

环境质量和排放标准是常用的环境管理工具，能使费用-效益分析对问题进行分解处理。当使用排放标准时，每个排放者都有可能在达到标准的前提下，使自己获得最大净效益（最小净费用），因而分解比较彻底。费用-效益分析的应用引出了三种不同类型的环境管理问题。

（1）使环境资源的所有使用者总的净货币效益最大（总货币费用最小）。

（2）使达到环境质量标准的所有排放者总的净货币效益最大（总货币费用最小）。

（3）使达到排放标准的每个排放者总的净货币效益最大（总货币费用最小）。

大部分环境问题处在第二种类型和第三种类型之间，或者是两者的结合。本节阐述了费用-效益分析的基本概念，在分析中又引进了约束条件（以环境或排放标准的形式反映）。应用这些标准，能得出不能用货币评价的资源使用价值，以及未能反映社会效益的货币使用价值。

最后要指出，成本-效果分析（cost-effectiveness）是寻找达到一定目标的最小费用方案的方法。确定以最小的费用，满足标准要求的环境管理方案，就是成本-效果分析要研究的问题。

二、系统分析应用举例

虽然本书着重论述环境问题的数学模拟，但是进行系统分析也可以不用数学模型。通过下列水质问题，阐述系统分析的基本概念，这个例子在第二章中还要用数学模型进行分析。

例 1-1 废水管理问题

某金属精炼厂每生产1kg金属，产生3kg废物，这些废物随工厂的废水排放，其浓度为 $2\text{kg}/\text{m}^3$ 。废水经过部分处理后，排入附近的河流。政府对该厂规定的废物排放标准为 $10000\text{kg}/\text{周}$ 。工厂每周生产金属 55000kg ，金属的售价是 1.30 美元/kg，生产成本为 0.90 美元/kg。厂内废水处理设施的处理能力为 $70000\text{m}^3/\text{周}$ ，处理费用是 0.20 美元/ m^3 。处理效率与污染物负荷有关，设 W 代表废水处理量，单位是 $10^4\text{m}^3/\text{周}$ ，当 W 的变化范围为0到7时，处理效率等于 $1 - 0.06W$ 。这个关系式说明，处理设施的负荷越大，处理效率越低。

如图1-2所示，这个废水管理问题主要是确定达到排放标准的有效途径。看起来好象问题很简单，其实与其它环境污染管理问题有许多相似之处。下面对这个例子进行分析。

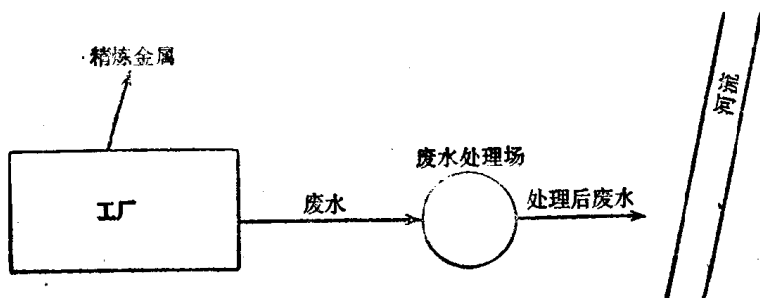


图 1-2 废水管理问题示意图

(1) 废物排放量与生产水平有关，是工厂精炼金属产量的函数。

(2) 废物或污染物随工厂废水排放，废水的强度以污染物浓度度量，本例为 $2\text{kg}/\text{m}^3$ 。

(3) 排放标准以污染物排放量为准，即排放污染物的千克数，而不是废水量。

(4) 废水处理设施很难将污染物全部去除。设 e 代表污染物的去除率, $e = \text{污染物去除量} / \text{污染物处理量}$, 去除率往往是污染负荷的函数。本例去除率与污染负荷的关系见图 1-3。当处理水量为 $25000 \text{ m}^3/\text{周}$, 去除率为 85% ; 处理水量增加为 $50000 \text{ m}^3/\text{周}$, 去除率下降到 70% 。

各种因素使问题复杂化, 而且没有一个明显的解。下面讨论系统分析的三个步骤。

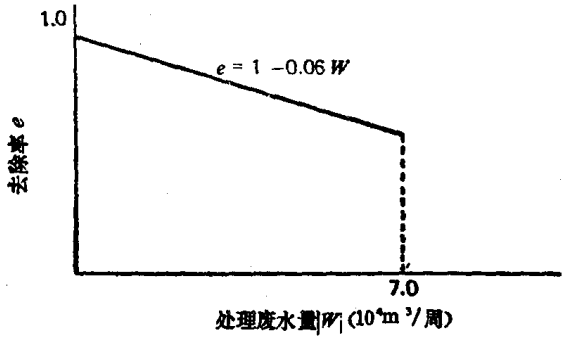


图 1-3 去除率与污水负荷的关系

(一) 目标和系统的确定

1. 目标

没有清楚的目标, 解决问题就非常困难。本例有几个可能的目标: (1) 削减污染, (2) 保护环境, (3) 处理污染物, (4) 节约资金。这些目标都是所希望的, 而且可能从求解中得到。可是对系统分析来讲, 它们还不充分。目标必须具体到足以能够度量达到目标的程度。因为系统分析要评价许多可能的解, 所以目标必须提供一个准则, 以便比较不同的方案。若有两个方案都能满足保护环境和处理污染物等方面的要求, 系统分析则必须了解哪个方案更好些。

目标的选择也一定与问题的决策者有关, 决策者可能采