

线性规划方法在环境容量资源分配中的应用

王金南¹, 潘向忠²

(1. 中国环境规划院, 北京 100012; 2. 杭州市环境科学研究院, 杭州 310014)

摘要: 分析了最优化数学方法, 尤其是线性规划方法在环境容量资源分配规划中的若干种应用类型, 提出了相关的目标函数模型和约束条件模型以及建立模型的基本步骤. 以大气环境容量资源分配为案例, 建立了大气环境容量分配优化线性规划模型及其边界约束条件. 计算表明, 线性规划最优化方法是解决区域大气环境容量资源分配的科学可行的方法.

关键词: 线性规划; 大气环境容量; 环境规划; 环境数学模型

中图分类号: X26 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2005)06-0195-04

Application of Linear Programming in the Allocation of Environmental Capacity Resources

WANG Jin-nan¹, PAN Xiang-zhong²

(1. Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China; 2. Hangzhou Institute of Environmental Sciences, Hangzhou 310014, China)

Abstract: This paper analyzes the application of optimization approaches, particularly the application types of the linear programming (LP) model in environmental planning and management; put forwards the objective function models and their constraint conditions. Based on the formulation of linear programming model related to environmental planning the paper develops the allocation model of environmental purification capacity (EPC), and identifies the constraints to EPC allocation and their parameters or coefficients. It is proved that LP approach is a practical and scientific tool for allocating EPC in specific region.

Key words: linear programming; environmental purification capacity; environmental planning; environmental mathematics models

最优化方法是数学模型与应用科学技术结合的产物. 最优化问题主要包括线性规划方法、约束条件下的优化、无约束条件下的优化、线性约束下的二次规划、离散规划优化、整数规划优化、多目标规划优化等内容^[1, 2]. 最优化方法中, 目前应用最广泛和最成熟的是线性规划方法. 1939 年, 康托洛维奇首次把线性规划应用于工业生产. 1947 年, G. B. Dantzing 提出了单纯形方法后, 线性规划便迅速形成了一个独立的理论分支. Karmarkar 于 1984 年提出了线性规划求解的内点算法^[1, 2]. 这些标志着最优化方法, 尤其是线性规划方法为实际应用提供了很好的基础平台和技术方法.

环境规划是环境管理中的重要环节和组成部分. 传统上, 环境规划方案优化选择采用有限离散情景方案比较方法, 最后选取相对较优的方案作为实施或推荐方案^[3, 4]. 随着最优化数学规划方法问世, 从 1970 年代以来, 国外一些研究机构相继采用线性规划方法开展环境规划研究^[3, 4], 把线性规划方法应用于流域污染控制规划^[5]. 1990 年代初以来, 中国环境科学研究院研究人员应用线性规划方法开展了若干城市的环境规划优化模型以及总量控制规划研究, 提出了求解大规模环境综合整治整数

规划 IPUSE 模型^[6~9], 最优化方法在环境规划中的应用取得了空前的发展. 近年来, 随着全国大气和水环境容量测算和污染物排放总量分配工作的推进, 中国环境规划院与有关单位相继开展了环境容量分配规划问题与计算方法的研究^[8].

本文主要对线性规划方法在环境规划与管理中的应用做一分析, 提出不同类型环境规划问题的最优化模型内容, 结合全国环境容量计算与分配任务, 以大气环境容量资源分配为案例, 建立大气环境容量资源分配优化线性规划模型.

1 环境规划最优化概念模型

1.1 环境规划最优化问题类型与特点

由于环境容量资源的有限性, 现实中环境规划最优化问题一般情况下都是约束条件下的最优化问题. 根据目标函数的特点划分, 主要有以下 4 种类型: ①区域污染削减费用最小化下的污染物削减量分配问题; ②区域环境容量资源利用最大化下的污

收稿日期: 2004-12-30; 修订日期: 2005-03-15

基金项目: 国家“十五”科技攻关课题 (2003BA614A-03)

作者简介: 王金南 (1963-), 男, 浙江武义人, 总工程师, 研究员, E-mail: wangjin@caes.org.cn

染物排放总量分配问题;③区域环境影响最小化或环境质量最优下的污染物削减量分配;④区域污染物削减量最小化下的污染物排放总量分配问题.实际中,最常见的是前面2种规划问题.

环境规划最优化问题有以下特点^[6,8~11]:①规划目标的多重性.最优化目标既可能是单目标也可能是多目标,如区域污染削减费用最低和环境影响最小;②规划变量非连续性.由于规划约束变量的特点,规划变量经常是0~1整数变量或者是离散变量,或者是变量值都是已经给定的离散方案取值;③环境影响的线性假设.一般来说,污染源之间影响传递函数通常都是非线性的,但是在特定的区域气象和水文条件下,可以近似假设为线性关系;④削减费用的线性假设.一般来说,单位污染削减费用与污染削减量之间存在边际递增关系,通常是二次递增函数关系.但是,对于特定的区域环境规划问题,为简化规划问题模型和降低规划问题的复杂性,一般采用平均削减费用系数,也就是削减费用与削减量之间存在线性关系;⑤建立规划模型的前期技术工作比较繁杂.主要表现在削减费用系数确定、环境影响传递(函数)系数确定、污染源削减方案确定、削减布局等;⑥规划最优化方法专业性.目前,一些研究单位已经针对环境规划中独特的污染削减量分配、污染物排放总量分配、环境管理决策等优化问题开发出一些专业软件,并得到了应用^[7,9,10~16].

在环境规划最优化问题中,约束条件主要有以下7种类型:①环境质量约束,即必须满足达到环境质量目标要求;②排放标准约束,即污染源必须达到国家或地方排放标准;③排放总量约束,即污染源必须满足相应的地方排放总量削减要求;④削减规模与削减效率约束,即对于特定的污染源污染削减,由于削减规模经济效率和削减技术的要求,对削减规模或者削减效率给出一定范围要求;⑤污染布局约束,即根据区域环境容量资源的特点对污染源削减的地理布局提出要求;⑥污染削减社会经济权重约束,即根据区域社会经济发展水平和人口布局对污染削减给出要求;⑦削减技术约束,即某些污染物的削减技术还不成熟,可能存在零削减方案.在环境规划优化问题中,最重要和最常见的约束是前4种约束,尤其是第①和第③约束在大部分环境规划中都会出现.

1.2 环境规划中的线性规划概念模型

主要以区域污染削减费用最小化和区域环境容量资源利用最大化2种规划类型为背景,提出相应

的概念模型.

(1)区域污染削减费用最小化模型^[14,15] 该模型选取污染源的污染物削减量为决策变量,目标函数为所有污染源所有污染物的削减费用总和最小,约束条件包括污染物最低削减量、环境质量要求以及变量非负要求.该问题的模型如式(1):

$$\text{Min} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^m x_{ij} \geq b_j (j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m f_{ji} (x_{ij}^0 - x_{ij}) \leq S_j^a \quad (3)$$

$$x_{ij}^0 \geq x_{ij} \geq x_{ij}^1 \quad (4)$$

$$(i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$$

式中, x_{ij} 为第 i 个污染源第 j 种污染物削减量, t/a; x_{ij}^0 为第 i 个污染源第 j 种污染物产生量, t/a; x_{ij}^1 为第 i 个污染源第 j 种污染物最低削减量, t/a; c_{ij} 为第 i 个污染源第 j 种污染物削减费用系数, 元/t; b_j 为区域第 j 种污染物最低削减量, t/a; S_j^a 为第 j 种污染物环境质量控制平均浓度标准, g/m³; f_{ji} 为第 i 个污染源第 j 种污染物的环境质量影响传递系数.

如果是污染源削减方案已经给定,那么上述规划问题就变换成为离散线性规划问题^[7],可以用(5)~(7)模型表述(以单一污染物为例):

$$\text{Min} P = \sum_{j=1}^n P(j, k(j)) \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^n A(i, j) \times B(j, k(j)) \leq S(i) \quad (6)$$

$$S(i) > 0 \quad (7)$$

$$(i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n)$$

$$k(j) \in \{1, 2, \dots, L(j)\}$$

式中, $P(j, k(j))$ 表示第 j 个污染源采用第 $k(j)$ 个技术措施的削减费用, 元/a; $A(i, j)$ 表示第 j 个污染源对第 i 个控制点的影响系数; $B(j, k(j))$ 表示第 j 个污染源采用第 $k(j)$ 个技术措施时的排放量, t/a; $S(i)$ 表示第 i 个控制点环境质量控制指标值, g/m³; $L(j)$ 表示第 j 个污染源的方案数; m 表示控制点的个数; n 表示污染源的个数; $k(j)$ 表示第 j 个污染源采纳的方案号; $L = \text{Max}\{L(j), j = 1, 2, \dots, n\}$ 表示本规划问题中的最大方案数.

从上述离散规划数学模型可以发现,要求解离散规划的最优解其关键是如何确定 $k(j)$, 也即每一污染源被优化的削减方案号.同时,为了求解离散规

划对模型数据有如下的约定:同一污染源其排放量与削减费用是一一对应的反序映射关系,也就是说,排放量从小到大排列,而削减费用则从大到小排列.

(2) 区域环境容量资源利用最大化模型^[16,17]
区域环境容量资源利用问题可以归结为如下问题:即如何在满足现有污染源格局(数量和相对位置)不变,各污染源的排放量在一定范围之内以及特定气象和水文条件下的污染物排放等约束条件下,尽可能有效地使用大气环境资源,在满足环境质量的条件下使得区域的污染物排放量最大.

在这个问题中,环境容量资源利用的目标是污染源排污量的最大化,约束条件是使各控制点满足环境目标值,且各污染源的排放量在一定范围之内.以单一污染物而言,选择各污染源的允许排放量 Q_i 为决策变量,目标函数为各污染源的允许排放量 Q_i 之和最大,约束条件确定为各污染源的允许排放量 Q_i 非负且受最大排放量限制.模型表述如(8)~(10):

Max $Q = \sum_{i=1}^n Q_i$ (8)

s. t. $\sum_{i=1}^m f_{ji} Q_i + c_{0j} \leq c_{sj} \quad (j = 1, \dots, m)$ (9)

$0 \leq Q_i \leq D_i P_i \quad (i = 1, \dots, n)$ (10)

式中: Q 为所有污染源排放量的总和, g/s ; Q_i 为第 i 污染源的源强优化允许排放量, g/s ; D_i 为第 i 污染源的行政权重系数, $0 \leq D_i \leq 1$, 特殊情况 D_i 可以大于 1, 一般取 1; f_{ji} 为第 i 污染源对控制点 j 的传递函数, s/m^3 ; c_{0j} 为第 j 控制点的污染物本底浓度, g/m^3 ; c_{sj} 为第 j 控制点的环境质量标准值, g/m^3 ; P_i 为第 i 污染源的上限排放量, g/s ; m 为环境质量控制点个数; n 为污染源个数.

2 大气环境容量资源分配案例

2.1 大气容量资源优化配置模型

以大气环境容量资源分配为例,简便起见,把污染源划分成面源(网格源)、点源 2 种类型,选取 SO_2 和 NO_x 2 种污染物,第 1.2 中的环境容量资源分配利用最大化模型就可以表述如式(11):

Max $Q = \sum_{i=1}^n Q_i$ (11)

(9) 和 (10) 的线性规划约束方程组展开如 (12) 和 (13):

$$\begin{vmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1j} & \cdots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2j} & \cdots & f_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{i1} & f_{i2} & \cdots & f_{ij} & \cdots & f_{in} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{m1} & f_{m2} & \cdots & f_{mj} & \cdots & f_{mn} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \cdots \\ Q_i \\ \cdots \\ Q_n \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} c_{01} \\ c_{02} \\ \cdots \\ c_{0j} \\ \cdots \\ c_{0m} \end{vmatrix} \leq \begin{vmatrix} c_{s1} \\ c_{s2} \\ \cdots \\ c_{sj} \\ \cdots \\ c_{sm} \end{vmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdots \\ 0 \\ \cdots \\ 0 \end{vmatrix} \leq \begin{vmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \cdots \\ Q_i \\ \cdots \\ Q_n \end{vmatrix} \leq \begin{vmatrix} D_1 & & & & 0 \\ & D_2 & & & \\ & & \cdots & & \\ & & & D_i & \\ & & & & \cdots \\ 0 & & & & D_n \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \cdots \\ P_i \\ \cdots \\ P_n \end{vmatrix} \quad (13)$$

式中符号同前.
线性优化时,如不对各源的最大排放量加以限制,则将出现个别或少数几个污染源排放量离奇大,绝大部分污染源排污量都要削减到 0,这显然是不合理的.为此,需要对各源的最大允许排放量加以限制.笔者在总结全国环境容量计算经验基础上,对以下 4 种方案作了比较分析,见表 1.

表 1 环境容量分配规划排污上限方案

Table 1 Up limit scenarios for allocating environmental purification capacity

编号	上限方案	优点	缺点
A1	现状排放量	能够达到优化的目的	以超标削减为目的,没有考虑部分源强可以增加
A2	排放标准允许排量	能够达到优化、浓度控制的目的	部分污染源允排量太大,与 A-P 值法结果相差较大,没有达到 P 值控制的目的
A3	A-P 值法计算的允排量	能够达到优化、P 值控制的目的	少数污染源没有达到浓度控制目的
A4 (中国环境规划院推荐)	基础允排量(即排放标准计算的允排量与 A-P 值法计算的允排量中的较小者)	能够达到优化的目的,并使分配允排量的起点公平,也符合总量控制、P 值控制和浓度控制三者相结合的污染控制方针	优化后,少数污染源企业需要削减到零排放,操作可行性有待管理部门配合和实际检验

对于线性规划模型最优解的算法在此不详细讨论,本文采用美国芝加哥 LINDO(Linear Interaction and Discrete Optimizer)公司研制的 LINGO 软件.该软件是解线性规划模型、整数规划模型、二次规划模型的强有力的工具,并可以进行灵敏度分析.

2.2 大气环境容量优化计算成果

本规划中污染源个数为 1286 个,其中点源 824 个,面源(网格源) 462 个,控制点为 50 个,传递系数为 64 300 个.采用上述模型,并综合运用 ADMS-Urban 大气扩散模型、APW 基础模型,以 2003 年为基础年,计算得到某市区 SO₂ 和 NO_x 污染物大气环境容量资源分配优化结果,如表 2 所示.

表 2 某市区大气环境容量优化分配(线性规划法—A4)/(t·a⁻¹)

Table 1 Optimal allocation result of air environmental purification capacity in one city by Linear Programming based on scenario A4/(t·a⁻¹)

污染物	现状排放量			环境容量最优分配方案		
	面源	点源	合计	面源	点源	合计
SO ₂	9 062	93 225	102 287	12 981	89 134	102 115
NO _x	15 230	138 237	153 467	21 022	126 523	147 545

2.3 大气环境容量分配结果校验

采用中国环境规划院 A-P 值模型^[8,17]对市区大气环境容量计算分配结果进行了校验,A-P 值计算结果见表 3.由表 2 与表 3 可知,2 种方法得到的各类污染物环境容量分配结果基本一致,SO₂ 和 NO_x 的相对偏差(以 A-P 结果为基准)分别为 -14.0%和 -0.2%,所出现的偏差符合环境容量计算方法之间的逻辑关系,即 A-P 法计算结果比其他方法略微偏大.

表 3 某市区大气环境容量分配测算(A-P 值模型)/(t·a⁻¹)

Table 3 Allocation result of air environmental purification capacity in one city by A-P Value Model/(t·a⁻¹)

污染物	现状排放量			环境容量分配方案		
	面源	点源	合计	面源	点源	合计
SO ₂	9 062	93 225	102 287	29 700	89 100	118 800
NO _x	15 230	138 237	153 467	37 000	110 900	147 900

3 结论和讨论

(1)分析了最优化方法在环境规划中的应用现状和发展趋势,尤其是线性规划方法是解决污染削减费用最小化和环境容量资源利用最大化问题的重要方法.

(2)提出了环境规划最优化问题比较常见的 4 种类型,归纳分析了环境规划最优化问题的 6 个特点以及环境规划最优化问题中 7 种类型的约束条件.

(3)以区域污染削减费用最小化和区域环境容量资源利用最大化 2 种规划类型为背景,提出了相应的环境规划优化概念模型.

(4)提出了某市大气环境容量资源分配模型,识别出相应的模型参数,运用 LINGO 软件计算了面源、点源 2 种污染源类型、1 286 个污染源、SO₂ 和 NO_x 2 种污染物环境容量的最优分配结果.

(5)对上述优化计算结果与中国环境规划院推荐的 A-P 值法计算结果进行了比较,认为容量分配资源优化结果可靠可行.

(6)利用线性规划方法解决环境规划问题,主要困难是如何把许多非线性约束转化成为线性约束.由于约束条件相对简化,容量分配优化结果出现偏大的结果.

参考文献:

[1] 韩继业,黄红选.最优化方法[M].北京:清华大学出版社,2004.

[2] 束金龙,闻人凯.线性规划理论与模型应用[M].北京:科学出版社,2003.

[3] 过孝民.环境规划与方法[M].北京:清华大学出版社,1998.

[4] 过孝民,张慧勤.环境经济系统模型与分析[M].北京:清华大学出版社,1999.

[5] Walter Spofford, Clifford S. Russell, Robert A. Kelly. Environmental Quality Management Application to the Lower Delacoare Valley[M]. Washington DC: Resources for the Future, 1976.

[6] 段宁,马建勋,等.城市环境综合整治最优规划方法[M].北京:中国环境科学出版社,1995.

[7] 胡炳清.总量控制中的离散规划[M].北京:中国环境科学出版社,2000.

[8] 潘向忠,王泉源,等.大气环境容量计算方法与应用实践[A].见:俞学曾.大气环境科学技术研究进展——第 11 届全国大气环境学术会议论文集[C].济南:2004,110~120.

[9] 段宁.大规模系统优化方法在环境规划中的应用前景分析[J].环境科学研究,1989,12(4):96~99.

[10] 孙启宏,乔琦,薛萍.城市环境实用决策支持系统(UEDSS)的研制[J].环境科学研究,1994,17(4):51~54.

[11] 于连生,等.模糊规划模型在污水治理费用计算中的应用[J].环境科学研究,1989,12(4):85~92.

[12] 王金南.国家环境质量决策管理支持系统的研制与开发[J].环境科学研究,1991,14(6):25~28.

[13] 王金南.离散多准则最优化决策模型在 NEQDSS 中的应用[J].环境科学,1992,13(4):15~19.

[14] 陈文颖.大气污染总量控制规划方法与智能决策支持系统[D].北京:清华大学,1996.

[15] 陈全辉,肖冬荣.对偶线性规划模型在大气污染物最优化控制中的应用[J].重庆环境科学,2002,24(2):52~55.

[16] 李凤娟.线性规划在大气污染物总量控制中的应用研究[J].内蒙古环境保护,2002,14(3):45~46.

[17] 中国环境规划院.城市大气环境容量测算技术指南(试用)[M].北京:中国环境科学出版社,2004.