第9卷第3期 气 候 与 环 境 研 究 Vol. 9 No. 3
2004 年 9 月 Climatic and Environmental Research Sept. 2004

基于单纯形优化方法的大气污染物总量控制模型

王宝民[1,2) 刘辉志[2) 王新生[3) 赵慕岩[3) 李懿[3)

1)（北京大学物理学院大气科学系，北京 100871）
2)（中国科学院大气物理研究所大气边界层和大气化学国家重点实验室，北京 100029）
3)（秦皇岛冶金设计院环境保护研究所，秦皇岛 066001）

摘 要 在总结大气污染物输送扩散模型和大气污染物排放总量模型的基础上，建立了基于线性规划单纯形方法的总量模型，并对多源正态烟流模型的适用性进行了检验。采用该模型计算了河北省唐山市高新技术开发区大气污染物排放总量，结果表明：在平原地区，该模式简捷实用，可用于大气环境容量及规划研究。

关键词：大气污染；总量控制；线性规划
文章编号 1006-9895（2004）03-0520-7 **中图分类号** X16 **文献标识码** A

1 引言

中国自实施环境影响评价制度以来，已由初期的重点控制浓度指标逐步过渡到污染物排放总量指标，其根本原因就在于抓住了污染源头，从而实施清洁生产战略。由于空间的开放性及气象条件的复杂性，大气污染研究相对来说更为复杂[1]。大气污染物总量控制包括污染物输送扩散和优化控制研究两方面（前者是后者的基础和保证），因而成为大气环境综合整治与环境容量计算的核心内容。污染物输送扩散模型基本可分为拉格朗日方法[2,3]和欧拉方法[4,5]两种，前者在处理污染源个数少却地形又比较复杂情况时有很大优越性，后者在处理多源多污染物时占有优势。多源正态烟流模型属于欧拉方法，虽然其时间分辨率和对复杂地形的处理有所欠缺，但空间分辨率高、机时节省以及对气象资料要求简单的特点弥补了上述不足，故具有极强实用性。

曾庆存[6]提出的自然控制论，为大气环境污染优化控制问题建立了数学理论框架，此后陈红岩等[7]对大气污染优化控制的一些实际问题进行了探讨，总的来说，在大气规划方法发展过程中，总量控制模型主要有 A-P 值控制法[8,9]以及多源模式加数学规划法[10~12]，A-P 值控制法是对区域大气污染物进行宏观总量控制的一种方法，它首先利用基于箱模型的 A 值法求得控制区内某种污染物的允许排放总量，然后采用 P 值法，在该区域内所有污染源污染物排放量之和不超过上述容量的约束条件下，确定出各个点源的允许排放量。城市多源模型加数学规划法的特点是将污染源及其扩散过程与控制点联系起来，以目标控制点的浓度达标作约束，通过线性、非线性规划或整数规划等优化方法[13]确定源的最大允许排放量或削减量。不同优化方法各有其优越性和不足，

2003-01-19 收到，2004-09-19 收到再改稿

万方数据

A-P 值法需要的输入参数简单，能迅速估算出给定控制区的污染物允许排放总量，并能对点源进行具体控制，其结果可操作性强，便于环境管理部门的行政管理，不足之处在于该方法不能充分反映污染源排放和控制点浓度的复杂关联。数学规划方法在很大程度上弥补了 A-P 值法的不足，但是却需要更多的输入资料，一般也要对污染物传输扩散模式进行检验。数学规划方法中整数规划（或称“0-1”规划）主要用于环境经济系统研究[14]，大气总量计算应用较多的仍然是线性规划方法，该方法在实际中的应用对促进经济和环境协调发展起到了至关重要的作用。

本文尝试将 A-P 法和多源模式加线性规划法结合起来，以后者为主，前者为辅。首先，利用污染源调查资料、气象资料和污染物浓度监测资料，对采用的多源正态烟流模式进行检验；其次，利用多源正态烟流模式计算污染源对计算点的浓度传输矩阵，在此过程中，对每个网格的污染物排放量采用 A-P 值法进行控制；最后用线性规划的单纯形方法计算大气污染物总量。两种方法结合的优越性在于：通常的线性规划模型在进行总量计算时，存在规划排放量“极端化”现象[15]，即部分污染源要么以下界排放，要么以上界排放，从而不能很好地符合实际工作需要，引入 A-P 值法后则很好的解决了这一问题。

2　模型建立和求解

2.1　多源正态烟流模式

有风时（距离地面 10 m，平均风速 $U_{10}\geqslant 1.5\ \mathrm{m\ s^{-1}}$）点源地面浓度计算公式[16]写为

$$c(x,y,0)=\frac{Q}{2\pi U\sigma_y\sigma_z}\exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)\cdot F, \tag{1}$$

其中

$$F=\sum_{n=-k}^{k}\left\{\exp\left[-\frac{(H_e-2n_1h)^2}{2\sigma_z^2}\right]+\exp\left[-\frac{(H_e-2n_1h)^2}{2\sigma_z^2}\right]\right\}, \tag{2}$$

式中，Q 为源强，σ_y、σ_z 分别为水平和垂直扩散参数，U 为排气筒出口处平均风速，h 为混合层厚度，H_e 为排气筒有效高度，n_1 为混合层顶反射次数，一般其总数 k 可取为 $k=4$。

小风（$0.5\ \mathrm{m\ s^{-1}}\leqslant U_{10}<1.5\ \mathrm{m\ s^{-1}}$）和静风时（$U_{10}<0.5\ \mathrm{m\ s^{-1}}$）点源扩散公式

$$c_L(x,y,0)=\frac{2Q}{2\pi^{\frac{3}{2}}\gamma_{02}\left(x^2+y^2+\frac{\gamma_{01}^2}{\gamma_{02}^2}H_e^2\right)}\cdot G, \tag{3}$$

其中，γ_{01}、γ_{02}分别为水平和垂直扩散参数的回归系数，G 为修正函数。

面源扩散计算采用虚拟点源法[17]，即对扩散参数进行修正后采用点源扩散公式。长期平均浓度计算以风向、风速、稳定度联合频率为权重，对各个污染源的贡献浓度进行加权求和。提醒读者注意的是：在 $U_{10}=1.5\ \mathrm{m\ s^{-1}}$时，(1)、(3) 两式浓度计算并不连续，这是文献 [16] 模式的一个缺陷，但作者并没有对其进行修改。

2.2　优化模型

根据线性规划理论[18]，优化模型可写作：在约束条件为 $AQ\leqslant C$ 及 $Q\geqslant 0$ 的条件下，

万方数据

使目标函数 $f(\boldsymbol{Q})=\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}$ 取最大值。此时求得的排放量总和 $\sum_{j=1}^{m}q_j$ 即为该区域的最大排放量。引入 A-P 值控制法后，对每个污染源的排放量进行限制，即 $q_j\leqslant 10^{-6}P_jC_{0j}H_{ej}^2$。由此得到 A-P 值控制法和线性规划法相结合的优化控制模型：

$$\max f(\boldsymbol{Q})=\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q},$$

$$\boldsymbol{AQ}\leqslant\boldsymbol{C},$$

$$\boldsymbol{Q}\geqslant 0,$$

$$q_j\leqslant 10^{-6}P_jC_{0j}H_{ej}^2,$$

以上各式中

$$\boldsymbol{A}=a_{ij},i=1,2,\cdots,n,\ j=1,2,\cdots,m,$$

$$\boldsymbol{Q}=(q_1,q_2,\cdots,q_m)^{\mathrm{T}},$$

$$\boldsymbol{C}=(C_1,C_2,\cdots,C_n)^{\mathrm{T}},$$

$$\boldsymbol{D}=(d_1,d_2,\cdots,d_m)^{\mathrm{T}},$$

符号意义为：m 为排放源总数；n 为环境质量控制点总数；q_j 为第 j 个污染源排放总量；P_j 为第 j 个污染源 P 值调整系数；C_{0j} 为第 j 个污染源所在功能区环境目标值；H_{ej} 为第 j 个污染源的烟囱有效高度；$\boldsymbol{A}$ 为计算点（即污染源）对环境质量控制点的浓度贡献系数矩阵，亦称传输矩阵；$\boldsymbol{Q}$ 为计算点的允许排放量矩阵；$\boldsymbol{C}$ 为环境质量控制点的约束浓度矩阵；$\boldsymbol{D}$ 为污染物排放量的系数矩阵，或称价值系数矩阵。

2.3 模型求解

首先利用多源正态烟流模式求得各个污染源对浓度控制点的传输矩阵，然后采用线性规划的单纯形法计算大气污染物总量。

3 多源正态烟流模式检验

模式检验在大气环境影响预测以及规划控制中占有重要位置，直接关系到结果的合理程度。在模式检验中污染源参数和气象参数[19]是两个关键影响因素。结合河北省唐山市高新技术开发区（位于唐山市北部，占地约 16 km^2，以下简称开发区）大气环境容量研究，对多源正态烟流模式的适用性进行检验。

3.1 污染物调查及现状监测

污染源调查范围以开发区为中心，面积约 70 km^2，调查主要内容为燃料结构和消耗量，以及重点污染源的分布和污染物排放量等。图 1 所示为调查区内主要污染源分布以及大气环境质量现状监测点位。调查区内煤及焦碳年消耗总量为 184×10^4 t，柴油和汽油 4.3×10^4 m^3，煤气 6509×10^4 m^3；污染物 SO_2、NO_x 和 TSP 年排放总量分别为 20 436、6 872 和 12 031 t。1999 年 2 月 8～12 日、8 月 18～22 日分别进行采暖季和非采暖季各 5 天的连续监测，共设 7 个监测点，TSP 每日连续监测 12 h，SO_2 和 NO_x 每日 18 h。3 种污染物的监测仪器分别为 KB120、MONITOR（8850）、MONITOR（8840），分析方法检出下限分别为 0.01、0.003、0.004 mg m^{-3}（N）。

3.2 气象参数

唐山市气象台位于开发区南部约 2 km 处，本次模式验证采用 1994～1998 年共 5

万方数据

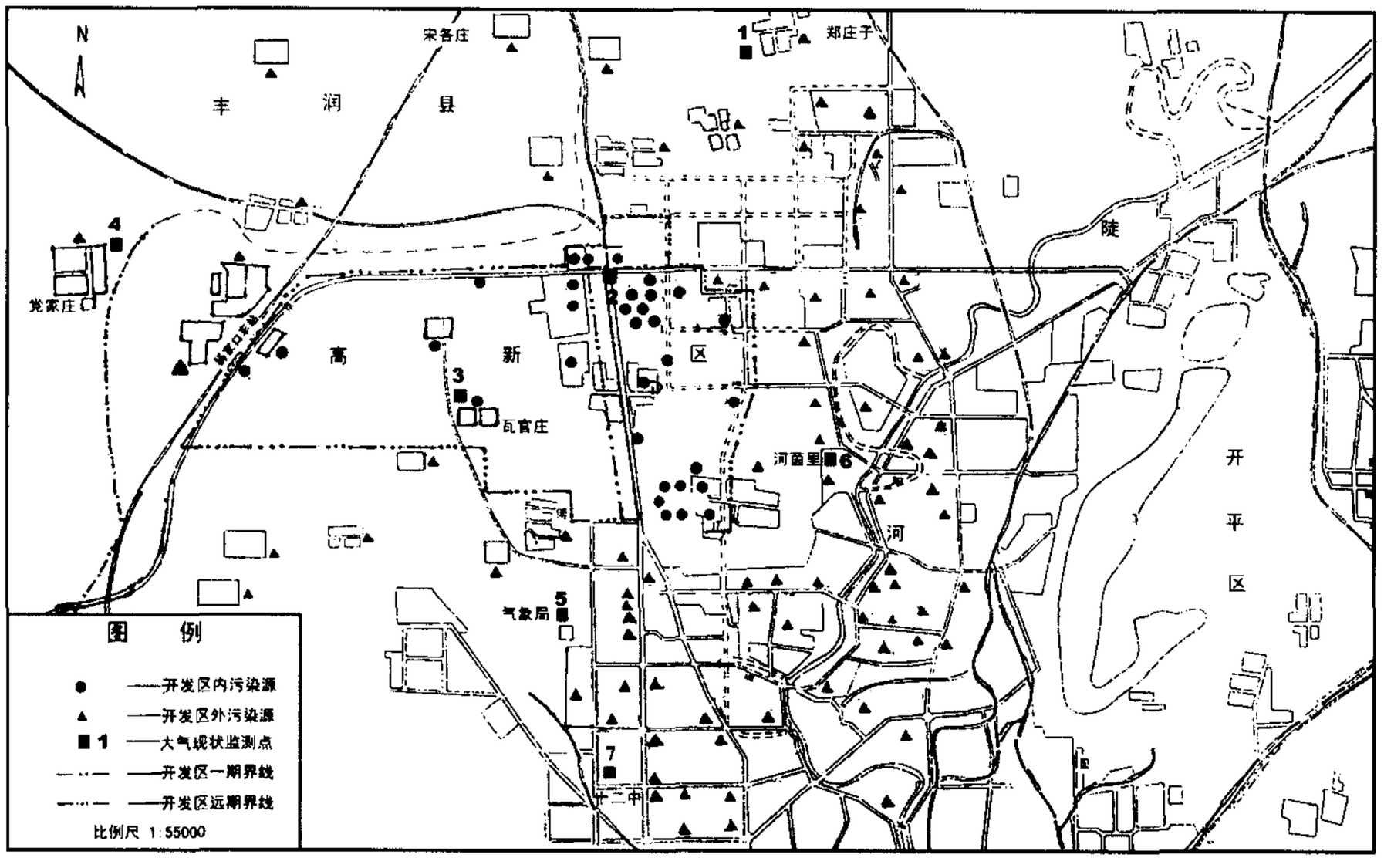

图 1　大气污染源分布及大气现状监测点位

年的地面风速、风向及云量常规资料。另外，大气边界层风温及混合层等参数采用 1993 年 12 月 10～23 日于唐山钢铁集团公司新厂区（位于开发区东北部约 5 km 处）的探空资料。

3.3　检验结果

检验因子为 SO_2，检验时段为采暖季（11 月 15 日～次年 3 月 14 日，共 4 个月），其原因主要有两方面：（1）大气中的 SO_2 主要来源于人类活动（工业生产和居民生活），而大气 SO_2 本底浓度较低，选择 SO_2 作为检验因子会尽可能保证监测浓度和计算浓度的对应；（2）从污染源调查可知，该区大气污染属于煤烟型，而采暖季燃煤量与 SO_2 浓度从理论上说应有较好的相关。SO_2 源参数处理方法为：首先将调查区网格化（10×8，网格间距 1 000 m），然后将处于同一网格的污染源进行源强加和，排放高度按源强加权平均，而高架污染源则单独处理。

从计算浓度和监测浓度的对比结果（表 1）可知，二者比较吻合，因而该多源正态烟流模式适用于该区域，可以用于开发区大气污染物总量计算。

表 1　SO_2 监测浓度和计算浓度对比

序号	监测点	监测浓度/ mg m^{-3} (N)	计算浓度/ mg m^{-3} (N)	相对误差/ %
1	郑庄子	0.037	0.0337	−8.0
2	管委会	0.035	0.0376	7.0
3	瓦官庄	0.034	0.0313	−7.0
4	党家庄	0.037	0.0313	−15.4
5	气象局	0.038	0.0402	5.0
6	河茵里	0.037	0.0463	25.1
7	十二中	0.034	0.0300	−11.0

万方数据

4 总量计算实例

4.1 输入参数

本文所需计算参数为：(1) 开发区大气环境容量计算，按网格划分计算点，每个网格为一个计算点（或污染源）。计算点总数 $m=10\times6=60$，网格边长 500 m；(2) 采用唐山市气象台 1994～1998 年共 5 年采暖季的风向、风速、稳定度联合频率，及经过检验的多源正态烟流模式，求得浓度传输矩阵 $\boldsymbol{A}$，其为一个 7×60 矩阵；(3) 控制点选为环境质量现状监测点（7 个点），并要求每个网格中的最大排放量小于 A-P 值法计算的允许排放量；(4) SO_2 目标浓度值，即该区域欲达到的浓度标准值，取为《环境空气质量标准》(GB3095－1996) 中二级年日平均浓度 0.06 mg m^{-3} (N)；(5) 本次计算没有考虑经济、社会投资方案，因而目标函数 $f(\boldsymbol{Q})=q_1+q_2+\cdots+q_m$，即 $d_j=1$，$j=1, 2, \cdots, 60$；(6) 考虑开发区外污染源和其他不可预知因素，在计算时记入 0.75 系数，即将部分排放量留给区外污染源；(7) 排放源有效源高取为 50、75、100、125、150、175、200 m 共 7 个高度，分别对应 30～100 m 的几何源高。

4.2 计算结果及讨论

计算所得开发区 SO_2 允许排放总量以及和有效源高的拟合结果见表 2。排放总量和平均有效源高有一定的关系，有效源高越高，则允许排放量越大。拟合公式为 $Q_{SO_2}=57.3010\ H_e^{1.0177}$，这给计算任意有效源高条件下的排放总量提供了极大方便，因而也给开发区环境管理工作提供了科学的参考工具。由开发区 SO_2 允许排放总量分布（图 2）可以看出，总量在开发区内的分布具有一定规律，这与开发区的位置以及控制点的选取有关，控制点重点选在开发区东部市区，因而西部和北部允许排放量较大是合理的。

在一个地区，大气污染物的浓度时刻发生着变化，并有很大的不规则性和偶然性，但在一定时间段内呈现周期变化。在中国北方地区，有明显的采暖季和非采暖季之分，如果将全年作为总量控制基准时间段，则会掩盖大气污染源的季节性变化，这正是本文采用采暖季作为基准时间的原因。环境质量目标控制值的选择应和控制基准时间段对应，但是我国《环境空气质量标准》(GB3095－1996) 并未给出季或月的相应标准，谷清[20]曾提出采用指数法求取季日平均浓度的方法（如：二级 SO_2 季日平均浓度为 0.071 mg m^{-3} (N)）。本文仍采用 SO_2 年日平均浓度标准值 0.06 mg m^{-3} (N) 作为环境质量目标的控制值，可以说执行了偏严的控制标准，即使如此，也并不能保证全年

表 2 SO_2 允许排放总量及拟合

有效源高/ m	排放量/ t a^{-1}	拟合排放量/ t a^{-1}	相对误差/ %
50	2596	3071	18.27
75	5139	4640	－9.71
100	7031	6218	－11.57
125	8666	7803	－9.96
150	9593	9394	－2.27
175	10375	10990	5.92
200	11112	12589	13.29

注：相关系数：0.9708；平均相对误差：10.11%；拟合公式：$Q_{SO_2}=57.3010\ H_e^{1.0177}$

万方数据

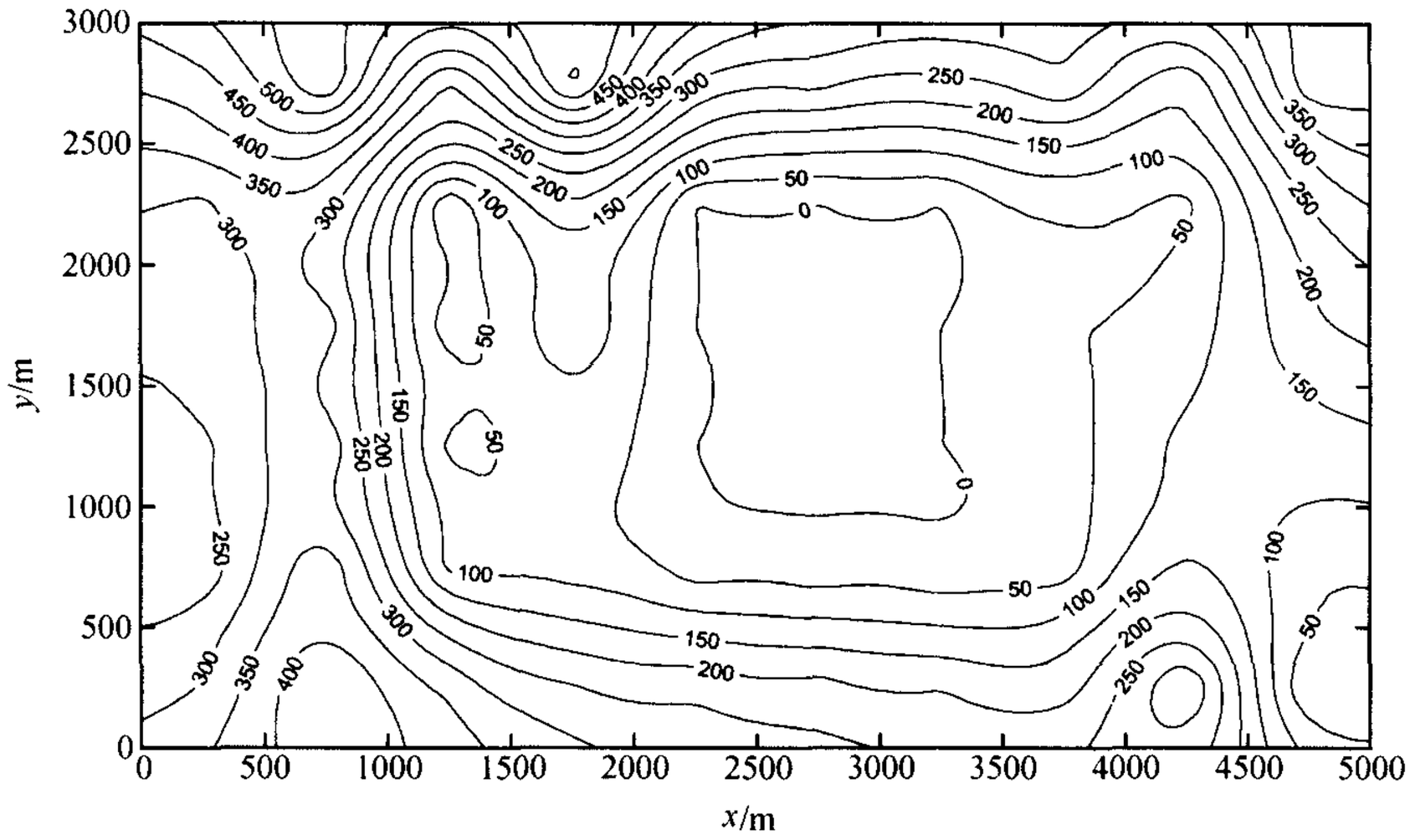

图 2　开发区 SO_2 允许排放总量分布（单位：t km^{-2} a^{-1}，有效源高为 50 m）

所有的日平均浓度都达标，至于如何在一定保证率下满足日平均浓度要求仍是一个有待探讨的问题。

5　结论

（1）在对多源正态烟流模式进行验证的基础上，采用 A-P 值法结合线性规划单纯形方法计算的大气污染物排放总量更为科学。同时也说明多源正态烟流模式在平坦地形上是一个有效简洁的大气输送扩散模型。

（2）采用本模型计算区域总量，便于总量控制管理。模型通过控制点的设立求解区域污染物允许排放总量，必要时也可以分配给具体污染源，为总量控制的实施提供指导操作的指标，将使总量控制落在实处。

（3）若考虑经济、社会、投资方案等，对目标函数进行合理确定，则该模型可以对区域污染源削减和大气环境规划提供科学指导。

（4）以年日平均浓度作为环境质量目标控制值如何保证（或在一定保证率下）日平均浓度都达标，这一点尚需要进一步探讨。

致谢　作者衷心感谢河北省唐山市气象局和环境保护监测站给予的热情帮助。

参　考　文　献

1　曾庆存，气候与环境预测和调控中的数学问题，气候与环境研究，2002，**7**（1），1～6.

2　Kljun，N.，M. W. Rotach，and H. P. Schmid，A three dimensional backward lagrangian footprint model for a wide range of boundary layer stratifications，*Bound.-Layer Meteor.*，2002，**103**，205～226.

3　Chan，T. L.，G. Dong.，C. S. Cheung.，et al.，Monte Carlo simulation of nitrogen oxides dispersion from a vehicular exhaust plume and its sensitivity studies，*Atmos. Environ.*，2001，**35**，6117～6127.

万方数据

4 安俊岭、王自发、黄美元等，区域空气质量预报模型，气候与环境研究，1999，**4**（3），244～251.
5 Sang Jianguo，Liu Heping，Liu Huizhi et al.，Observational and numerical studies of wintertime urban boundary layer.，*Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*，2000，**87**，243～258.
6 曾庆存，自然控制论，气候与环境研究，1996，**1**（1），11～20.
7 陈红岩、胡非、曾庆存等，大气环境污染优化控制的实际问题，气候与环境研究，1998，**3**（2），163～172.
8 范绍佳、黄志兴、刘嘉玲，大气污染物排放总量控制 A-P 值法及其应用，中国环境科学，1994，**14**（06），407～410.
9 李玉麟，A-P 值法在城市大气环境规划中的应用，云南环境科学，1995，**14**（1），24～31.
10 国家环境保护局中国环境科学研究院，城市大气污染总量控制方法手册，北京：中国环境科学出版社，1991.
11 马小明、李诗刚、栾胜基等，中国城市大气污染物总量控制方法及案例研究，北京大学学报（自然科学版），1999，**35**（2），265～270.
12 马小明、李诗刚、栾胜基等，大气污染物总量控制方法的区域排放当量控制制定方法，中国环境科学，1996，**16**（5），350～353.
13 国家环保局计划司《环境规划指南》编写组，环境规划指南，北京：清华大学出版社，1994，289～300.
14 郭怀诚、邹锐、刘磊，不确定性条件下经济开发区环境规划方法和应用研究（II），北京大学学报（自然科学版），1999，**35**（6），802～808.
15 王勤耕、李宗恺，城市大气污染源排污负荷优化分配模型，环境科学学报，1996，**16**（4），444～449.
16 国家环境保护局，环境影响评价技术导则，北京：中国环境科学出版，1994，24～27.
17 李宗恺、潘云仙、孙润桥，空气污染气象学原理及应用，北京：气象出版社，1985，417～419.
18 刘天齐，城市环境规划规范及方法指南，北京：中国环境科学出版社，1992，101～106.
19 桑建国、温市耕，大气扩散的数值计算，北京：气象出版社，1992，266～279.
20 谷清，中国区域大气总量控制基准和方法，中国环境科学，2000，20，25～28.

Simplex Optimum Model for Total Air Pollutant Emission Control

Wang Baomin [1,2)]，Liu Huizhi [2)]，Wang Xinsheng[3)]，Zhao Muyan[3)]，and Li Yi[3)]

1) (*Department of Atmospheric Sciences*，*School of Physics*，*Peking University*，*Beijing* 100871)

2) (*State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and atmospheric Chemistry*，*Chinese Academy of Sciences*，*Institute of Atmospheric Physics*，*Beijing* 100029)

3) (*Research Institute of Environmental Protection*，*Qinhuangdao Institute of Metallurgical Research and Design*，*Qinhuangdao* 066001)

Abstract Based on the summarized review of the models of air pollutant transmission and diffusion and the models of total air pollutant emission control，a simplex optimum method for the total control model was suggested and then the verification of multi-sources Gaussian model was conducted. The model was applied to calculate experimentally the total air pollutant emission for High-tech Development District，Tangshan City of Hebei Province. The results show that this model was concise and practical when applied to plain and can be used for studying of environmental capacity and programming.

Key words: air pollution; total emission control; linear program

万方数据