刘磊, 胡非. 2019. 基于多属性决策的区域大气复合污染多目标优化控制方法研究 [J]. 气候与环境研究, 24(4): 407−416. Liu Lei, Hu Fei. 2019. Multi-attribute decision-based multi-objective optimization for regional atmospheric compound pollution control [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(4): 407−416. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18034

基于多属性决策的区域大气复合污染多目标优化控制方法研究

刘磊 胡非

中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室，北京 100029

摘 要 大气复合污染是我国目前面临的主要大气环境问题。科学减排对大气复合污染形成起主要作用的一次污染物和二次污染的前体物，是治理大气复合污染的有效手段。本文提出了一种新的区域大气复合污染多目标优化模型，并结合多目标进化算法和基于决策者偏好的多属性决策技术，寻找治理大气污染的最优控制策略。与传统的单目标优化控制技术相比，本文提出的方法在保证环境达标的前提下，同时兼顾治理成本和行业可持续性发展这两种在一定程度上互斥的目标，并融入了决策者从当地实际情况出发对目标重要性的权衡，更加符合管理实践的需求，可为科学治理区域大气复合污染提供借鉴。

关键词 大气复合污染 多目标优化模型 多目标优化算法 多属性决策方法

文章编号 1006-9585(2019)04-0407-10 **中图分类号** X51 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18034

Multi-attribute Decision-Based Multi-objective Optimization for Regional Atmospheric Compound Pollution Control

LIU Lei and HU Fei

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

Abstract Atmospheric compound pollution is the primary atmospheric environmental problem in China. Reducing the emissions of primary and secondary pollution precursors is an effective method to control atmospheric compound pollution. In this study, we propose a new multi-objective optimal control model of regional atmospheric compound pollution. Multi-objective evolution algorithms and multi-attribute decision methods based on preference are used to formulate the optimal strategies for this model. As a prerequisite to ensure that air quality is up to standard, our method, which is different from the most commonly used single-objective methods, can achieve a balance between cost and development. We believe that this method will be helpful in making scientific strategies to control regional atmospheric compound pollution.

Keywords Atmospheric compound pollution, Multi-objective optimization model, Multi-objective optimization algorithm, Multi-attribute decision

收稿日期 2018-03-06；**网络预出版日期** 2018-05-06

作者简介 刘磊，男，1981 年出生，博士，副研究员，从事大气边界层物理和大气湍流、风能气象以及大气污染优化控制研究。E-mail: liulei@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点研发计划项目2016YFC0208802、2017YFC0209600，国家自然科学基金项目41675012

Funded by National Key R&D Program of China (Grants 2016YFC0208802 and 2017YFC0209600), National Natural Science Foundation of China (Grant 41675012)

1 引言

随着社会发展，能源消耗的快速增长，大气环境特别是人口过度集中的城市大气环境问题日益突出。改革开放以来，我国工业化和城市化步伐加快，大气环境污染问题在近30年内集中爆发。在传统的局地单一煤烟型污染仍未得到完全控制之时，又出现了新型的以PM2.5（空气动力学当量直径小于等于2.5 μm的颗粒物，即细颗粒物）、O_3污染为主要特征的区域大气复合污染（Chan and Yao，2008；张远航，2008）。区域大气复合污染以多源排放、多污染物、多理化过程、多尺度相互耦合等为主要特征（贺克斌等，2011）。与传统单一型大气污染控制相比，复合型大气污染的控制因子较多、控制范围较广、控制不确定度较大、控制手段更为精细复杂，是当前大气污染治理工作中面临的难题。

人们已提出多种切实可行的方法来控制和治理大气污染。其中，基于最优化数学方法和理论的大气污染优化控制策略，一直是大气污染防治理论和实践中的重要研究内容。早在二十世纪六、七十年代，国外学者就尝试利用线性规划方法寻找控制费用最小的策略（Teller，1968；Gorr et al.，1972）。目前，在全球多个地区得到推广应用的GAINS（Greenhouse gas-Air pollution Interactions and Synergies）系统，也采用了优化算法来寻找最小控制费用策略（IIASA，2009）。由于大气环境形势日益严峻，我国学者也积极开展了大气污染优化控制方面的工作。曾庆存（1996）首次提出了“自然控制论”，揭示了不同自然学科背景下多种控制问题背后统一的数学本质，并作为个例提出了工业污染源布局的最优化模型。基于“自然控制论”的框架，陈红岩等（1998）建立了大气污染总量控制线性规划模型。朱江等（2002）基于伴随模式的最优化方法，推导了求解这一问题的数学方法。伴随方法随后也被用于优化控制研究（刘峰等，2004；刘峰和黄顺祥，2011）。柴发合等（2006）从国家、区域和城市3个层次上建立大气污染物总量控制优化模型，并在多个省市开展示范研究。方叠等（2013）建立了具有软约束条件的控制费用最小目标的线性规划模型。胡炳清等（2015）基于控制费用最小目标的优化模型，开发了大气复合污染区域调控与决策支持系统。黄顺祥（2018）系统回顾了大气污染防治研究的理论框架和核心科学问题，指出了该领域未来发展的主要方向。

现有的大气污染优化控制模型大多是单目标优化模型，主要以控制费用最小或总排放量最大为目标。然而，在实际减污治污方案制定过程中，管理者需兼顾考虑治理成本以及减排对当地经济发展等的影响。因此，较为贴合实际的大气污染优化控制模型必然是多目标优化模型。多目标优化模型的解在理论上与单目标模型有本质区别，后者是单一的最优解，前者却是一组相互之间无法比较孰优孰劣的非劣解集。为了从非劣解集中筛选出最终的策略方案，就需要决策者根据自己的经验，对多个目标进行偏好排序，进而找出最符合该偏好排序的策略。本文将根据多目标优化理论和技术，建立以控制费用最小和经济发展所受影响最小为目标的区域大气复合污染多目标优化模型，采用进化多目标优化算法和多属性决策算法，计算符合决策者偏好的最优控污策略。

2 优化模型及寻优方法

2.1 区域大气复合污染多目标优化模型

设区域内有n_L个污染控制子区域（L），每个子区域有n_I类污染物排放行业（I），每类行业排放n_X种一次污染物和二次污染物前体物（X）。一条减排措施就由污染控制子区域、污染控制行业和减排污染物种类这3种属性[记作$\Omega \equiv (L, I, X)$]所确定。减排措施总数n满足：$n \leqslant n_L \times n_I \times n_X$. 经过减排调控后的排放量$E(\Omega) = E_0(\Omega)[1 - z(\Omega)]$，其中，$E_0$是现状排放量，$z$是属性为Ω的减排措施对应的减排率。减排一般有两种方式：限产和加装环保设备。设限产导致的减排率为x，加装环保设备导致的减排率为y，总减排率$z = x + y$. 区域大气复合污染多目标优化控制的目的，就是在空气质量达标的约束下，寻找一组最优减排率组合。所谓最优，即该组减排率能同时兼顾控污费用（加装环保设备带来的费用）最小和经济发展所受影响（限产带来的影响）最小两个目标。

根据以上描述，区域大气复合污染控制的多目标优化数学模型建立如下：

$$\min P\left(y_1, y_2, \ldots, y_n\right), \min D_{L,I}\left(x_1, x_2, \ldots, x_n\right)$$
$$\text{s.t.} \quad 0 \leqslant C_{X^*}(z_1, z_2, \ldots, z_n) \leqslant \alpha_{X^*}$$
$$0 \leqslant z_i \leqslant \beta_i \ (i = 1, 2, \cdots, n), \qquad (1)$$

其中，目标函数P表示安装环保设备所需总成本，定义为

$$P = \sum_{i=1}^{n} y_i E_{0,i}\, p_i\,, \qquad (2)$$

式中，p_i是第i条具有属性Ω的减排措施对应的成本，即在子区域L内的行业I通过加装环保设备治理单位排放污染物X所需要的成本。目标函数$D_{L,I}$表示限产对子区域L内产业I所带来的影响，可用减排率空间中的距离来定义：

$$D_{L,I} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_i^2 k}\,, \qquad (3)$$

式中，参数k是选择因子，当x_i是关于子区域L内产业I限产减排率时，$k = 1$，否则，$k = 0$. 模型的约束条件中，X^*表示待控制的大气复合污染物，例如：PM2.5或O_3。C_{X^*}表示待控制污染物X^*在区域内国控点的年平均浓度。C_{X^*}和$(z_1, z_2, \ldots, z_n)$的关系称为减排—浓度响应函数。常数α_{X^*}表示区域内污染物X^*年平均浓度达标值。常数β_i表示第i条减排措施对应的最大减排率。

本模型假设在企业生产工艺不变的情况下，企业产值与排放量有关，排放量越大，产值越高，排放量越小，产值越低。在减排率不大的时候，减排情景到现状排放在减排率空间中的距离，近似衡量了由于减排造成企业产值的下降。决策者希望控污措施不要对重点企业的生产现状产生过多的干扰，以保证社会经济平稳有序的发展，因此可将减排率空间中的距离最小作为一个目标。在下文叙述中，目标函数$D_{L,I}$称为减排距离。减排距离最小的目标与减排造成企业的经济损失最小目标在数学上其实是等价的。减排造成企业的经济损失定义为

$$M_{L,I} = \sum_{i=1}^{n} x_i E_{0,i} g_i k\,, \qquad (4)$$

其中，g_i是单位减排量对应的货币化经济损失。以2维减排率空间为例，在该空间中，$D_{L,I}$的等值线是以坐标原点为圆心的圆，$M_{L,I}$的等值线是直线。如图1所示，在Pareto解集取值范围内，$\min D_{L,I}$，即半径最小的圆与$\min M_{L,I}$，即截距最短的直线，相交于Pareto解集方框左下角，可知两者是等价的。尽管两者等价，使用减排距离作为目标函数明显更具优势。减排距离的引入避免了使用某种污染物单位减排量引起的企业经济损失数据，这类数据的获取一般较为困难。

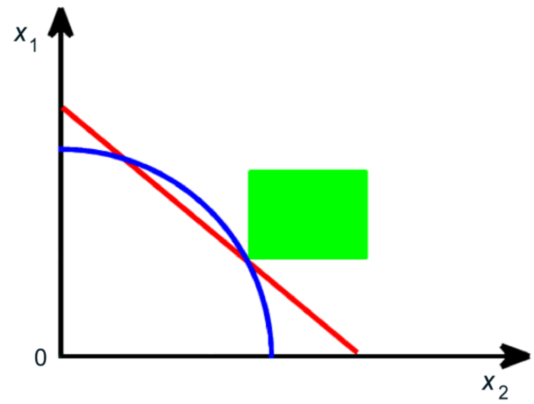

图1　二维减排率空间(x_1, x_2)中减排距离最小目标（$\min D_{L,I}$）和减排造成企业经济损失最小目标（$\min M_{L,I}$）等价性示意图。绿色方框表示Pareto解集的取值范围，红线是$M_{L,I}$的等值线，蓝线是$D_{L,I}$的等值线

Fig. 1　Equivalence between the minimum of emission reduction distance ($\min D_{L,I}$) and the minimum of emission reduction loss ($\min M_{L,I}$) in the two dimensional space of reduction rate (x_1, x_2). The isoline of $M_{L,I}$ is denoted by a red line, and the isoline of $D_{L,I}$ is denoted by a blue circle. The domain of the Pareto set is denoted by a green rectangle

2.2　Pareto解集和多目标优化进化算法

不同于单目标优化问题，多目标优化问题由于目标之间相互冲突，往往得不到最优解。多目标优化问题的目标在于求出一组解集，解集中的每个解满足问题的约束条件，但从目标的角度而言，相互之间无法分出优劣，该解集称为Pareto解集（亦称为非劣解集或非占优解集）。除所有解的目标值均相等的情况，Pareto解必然至少有一个目标值优于解集中的其他解，也必然至少有一个目标值劣于解集中的其他解。Pareto解集映射在目标函数空间中的点集称为Pareto前端。衡量寻优算法好坏的一个标准就是看Pareto前端是否具有较好的均匀分布性和宽广性（雷德明和严新平，2009）。

传统的多目标优化算法往往通过加权或将目标转化为约束条件等方式，将多目标问题转化为单目标问题求解。这种求解方法会带来诸多困难：首先，传统方法为了求得原问题的Pareto解集，需要调整权重或容许值，多次运行单目标求解算法，对较复杂的多目标问题，计算开销会大大增加。其次，传统方法有时对Pareto前端的形状很敏感，不

能处理Pareto前端的凹部，因而不能很好求解函数数学性质不好的多目标优化问题（焦李成等，2010）。

为了解决传统算法存在的问题，人们通过模仿自然界生物竞争、遗传和演化等机制，提出了一类解决多目标优化问题的新算法——进化算法。进化算法采用启发式搜索的方法，从随机选取的初始种群出发，通过种群之中个体的相互比较和竞争，淘汰非Pareto解，维持或产生新的潜在Pareto解。经过数代繁衍，算法将保证整个种群趋近真实的Pareto解集。进化算法可以通过一次优化过程得到具有代表性的Pareto解集，且对目标函数数学性质或Pareto前端的形状要求不高，现已成为求解复杂多目标优化问题的主要方法。目前，发展较为成熟、应用较为广泛的经典进化算法主要有：非劣排序遗传算法（简称NSGA-II）（Deb et al.，2002）、强度Pareto进化算法（简称SPEA2）（Zitzler et al.，2002）和Pareto包络选择算法（简称PESA-II）（Corne et al.，2001）等。进化算法以其强大的计算能力和广泛的适用性，自二十世纪九十年代受到关注以来，至今仍是多目标进化算法的主流研究方向之一（公茂果等，2009）。

3 基于决策者偏好的决策方法

复杂优化模型的Pareto解集一般非常大，寻优出来的具有代表性的Pareto解数量众多，但决策部门在发布污染防控行动计划时，只需参考其中的一个解。此外，决策部门在制定防控政策时往往会对目标进行权衡，形成对不同目标的偏好。例如，决策者会权衡减排方案对不同地区经济发展的影响，优先保证某些地区的经济发展受减排方案影响的程度降到最低。

在管理科学中，利用决策者主观偏好信息，从Pareto解集中筛选出唯一决策解的过程，称为多属性决策。多属性决策方法主要有简单加权法、多属性价值函数法、理想点法（Hwang and Yoon，1981）、ELECTRE（Elimination Et Choice Translating Reality）方法（Figueira et al.，2005）、PROMETHEE方法（Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation）（Brans and Mareschal，2005）和层次分析法（Saaty，2008）等。多属性决策过程中，目标函数权重的计算至关重要，其计算方法主要有主观赋权法和客观赋权法两类。主观赋权法主要是利用决策者偏好，并应用一定数学方法确定目标权重。客观赋权法是在缺乏决策者主观偏好信息时，直接利用一定的数学规则来确定目标权重。主观赋权法中，通常做法是让决策者对目标函数进行两两比较，得到定性偏好，再用偏好标度将定性偏好定量化。常用的偏好标度有Saaty标度（Saaty，2008）、几何标度（Lootsma，1993；Ji and Jiang，2003）、Ma-Zheng标度（Ma and Zheng，1991）和Salo-Hämäläinen（Salo and Hämäläinen，1997）标度等。主观赋权法中常用的求取权重的数学方法有特征向量法、近似法和最小平方和法等。有关多属性决策的主、客观赋权法的详细内容，可参看杨保安和张科静（2008）的介绍。

4 应用案例

4.1 案例设计

本文设计如下虚拟案例，展示上述区域大气复合污染多目标优化控制策略的计算流程。设某地区划分了4个环保控制区，分别记为A区、B区、C区、D区。在这4个区域内，分布有火电、钢铁和水泥三类行业。待控制污染物X^*为PM2.5。大气PM2.5污染主要来源于企业排放的一次PM2.5颗粒以及由气态前体物SO_2、NO_x、NH_3和VOCs等通过复杂的化学反应生成的二次颗粒物。由于现有的第三代大气化学数值模式对VOCs转化为PM2.5中有机气溶胶的模拟效果不好，实际的控制方案研究中较少考虑VOCs的定量控制（薛文博等，2017）。本次案例待减排污染物X主要有SO_2、NO_x、NH_3和一次PM2.5，不包括VOCs。

在基准年，该地区内国控点监测的PM2.5年均浓度为53.88 μg/m^3，超过了国家环境空气质量二级标准限值35 μg/m^3。4个环保控制区各行业在基准年排放情况如表1所示。从表中可以看出，某些地区某些行业的排放为0，扣除排放为0的情况，通过限产进行减排的措施共有40条。此外，该地区火电和钢铁行业绝大部分集中在B区，水泥行业绝大部分集中在B区和C区，因此减排距离目标可定为B区所有行业减排距离最小（minD_B）以及C区水泥行业减排距离最小（minD_C），以此来确保减排措施不会对该地区产业发展造成过大的冲击。对

于火电、钢铁和水泥等工业源，NH_3的排放相对较少，加装的环保设备主要分为脱硫、脱硝和除尘三类。在真实案例中，需要通过市场调研，综合考虑各类设备不同工艺流程下的成本，再确定相应治理成本。本案例是虚拟案例，所用的虚拟成本数据如表2所示。结合表1和表2，通过加装环保设备进行减排的措施共有33条。因此，措施库中总减排措施数为73.

4.2 减排—浓度响应函数的线性近似

二次污染物与前体物的减排-浓度响应函数$C_{X^*}(z_1, z_2, \cdots, z_n)$一般是非线性的。当减排率较小时，非线性减排—浓度响应函数可近似为线性函数：

$$C_{X^*}(\boldsymbol{z}) \approx C_{X^*}(\mathbf{0}) + \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial C_{X^*}}{\partial z_i} z_i \approx C_{X^*}(\mathbf{0})\left(1 - \sum_{i=1}^{n} \delta_i z_i\right), \tag{5}$$

其中，$C_{X^*}(\boldsymbol{z}) \equiv C_{X^*}(z_1, z_2, \cdots, z_n)$，$C_{X^*}(\mathbf{0})$表示未减排时国控点污染物$X^*$的年均浓度，$\delta_i$称为减排—浓度变化率，定义为

$$\delta_i \equiv \frac{C_{X^*}(\mathbf{0}) - C_{X^*}(\beta_i)}{\beta_i C_{X^*}(\mathbf{0})} = \frac{1 - h_j}{\beta_i}, \tag{6}$$

变量$C_{X^*}(\beta_i)$表示第i条减排措施的减排率为β_i，其它减排措施的减排率等于0时，国控点污染物X^*的年均浓度，且$C_{X^*}(\beta_i)/C_{X^*}(\mathbf{0}) = h_j$。常数$\beta_i$即第$i$条减排措施对应的最大减排率。

线性减排—浓度响应模型中的参数h_j不能在[0, 1]范围内任意取值。在最大减排情景下，$C_{X^*}(\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_n) \leqslant \alpha_{X^*}$，否则优化模型无解，据此可推导出：

$$\sum_{j=1}^{n}(1 - h_j) \geqslant 1 - q, \tag{7}$$

其中，$\alpha_{X^*}/C_{X^*}(\mathbf{0}) = q$. 由于$\sum_{j=1}^{n}(1 - h_j) \geqslant (1 - \max h_j)n$，因此，若

$$\max h_j \leqslant 1 - \frac{1 - q}{n}, \tag{8}$$

表1 本案例污染物排放现状

Table 1 Current pollutant emissions of our case

行业	排放污染物	污染物排放量/t a^{-1}			
		A区	B区	C区	D区
火电	SO_2	1912.5	78204.4	2808.5	2693.1
	NO_x	2096.4	25748.9	2234.5	904.6
	NH_3	32.2	2046.2	416.2	148.2
	一次PM2.5	129.2.	5522.2	1007.7	380.8
钢铁	SO_2	5.5	8608.8	35.4	0.0
	NO_x	36.7	7601.8	37.3	0.0
	NH_3	0.0	82.9	0.0	0.0
	一次PM2.5	0.5	5381.2	5.9	0.0
水泥	SO_2	1566.6	7644.7	7744.9	1468.1
	NO_x	4554.0	21872.3	19153.3	5924.6
	NH_3	0.0	0.0	254.4	11.7
	一次PM2.5	1413.3	10676.2	8483.1	2930.1

表2 本案例中加装环保设备的治理成本

Table 2 Prices of environmental protection devices in our case

治理污染物	治理成本/CNY t^{-1}		
	火电	钢铁	水泥
SO_2	3000	4000	8000
NO_x	7000	5000	3000
一次PM2.5	300	9000	60

则可恒保证（6）式成立。同理，可推知：

$$\min h_j \geqslant 1 - \frac{1}{n}, \tag{9}$$

可保证约束条件 $C_{X^*}\left(\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_n\right) > 0$ 恒成立。

本文展示的虚拟案例采用线性减排—浓度响应函数，其中参数 β_i 均取值为0.3，参数 α_{X^*} 取值为国家环境空气质量二级标准限值35 μg/m^3，参数 h_j 用落在区间$(1 - 1/n, 1 - 1/n + q/n)$内的n个均匀分布样本代替。在真实案例中，建议结合本地排放清单，利用中尺度大气数值模式耦合大气化学数值模式，例如WRF-CMAQ或WRF-Chem，模拟得到分段线性减排—浓度响应函数或更加精确的响应面模型（RSM）来取代单一的线性响应函数（劳苑雯等，2012）。

4.3 主要结果

本案例利用MATLAB R2017a提供的NSGA-II算法程序求解优化模型的Pareto解集。NSGA-II算法寻优过程如图2所示，算法从第0代随机设置初始解开始，迭代寻优直到163代，由于Pareto解集宽广性的平均变化小于设置值而停止。从整个寻优过程来看，NSGA-II算法针对本文的优化模型，收敛速度较快，在第90代时已基本收敛到最终的Pareto集上。本案例的Pareto前端形状不规则，前端分布范围较广，若用传统多目标转化为单目标算法寻优，势必会带来诸多困难，而进化算法能有效处理这类问题。

本案例利用Saaty标度定量刻画决策者偏好。Saaty标度将目标之间两两比较的偏好程度从“同样重要”到“极端重要”分为9档。为展示优化模型的性能，构建如下3种偏好情景：（1）成本偏好型。该情景下，成本目标优先考虑，减排距离目标相较于成本目标偏好标度为1/7，减排距离目标之间偏好标度为1；（2）发展偏好型。该情景下，B区行业的发展优先受到保护，C区水泥行业发展次之，最后才考虑成本目标。因此，B区行业的减排距离相较于成本的偏好标度为7，相较于C区水泥行业减排距离的偏好标度为3，C区水泥行业减排距离相较于成本的偏好标度为5；（3）均衡偏好型。所有目标之间两两比较的偏好标度均为1。

本文利用最小平方和法，根据Saaty标度确定的判断矩阵，确定3种偏好情景下对应的目标权重。计算结果表明，成本偏好型权重为（0.11, 0.11, 0.78），发展偏好型权重为（0.67, 0.25, 0.08），均衡偏好型权重为（0.33, 0.33, 0.33），括号中权重值从左至右分别对应目标minD_B、minD_C和min$P$。根据这些权重值，对目标函数进行简单加权求和，最大求和值对应的Pareto解即为3种偏好情景下的减排决策。对于同一组权重值，本方法计算得到的减排决策，与传统多目标转化为单目标的加权法计算结果一致。但是，传统的加权法的权重是人为任意选取的，权重意义不明确，本文的权重是根据决策者偏好信息计算出来的，权重意义明确，更加贴合实践需求。

图2第163代Pareto前端图中显示了3种偏好情景下的Pareto解在前端中的位置。可以看出，发展偏好型情景减排距离最小，但治理成本最大，成本偏好型情景治理成本最小，但减排距离最大，均衡偏好型情景各目标值居中。图3显示了3种减排情景下的减排措施，可见成本偏好型情景倾向于通过限产来减排，发展偏好型情景倾向于通过加装环保设备来减排，均衡型两者兼顾。按照三种措施进行减排后，PM2.5年均浓度值分别为32.04 μg/m^3（成本型）、32.12 μg/m^3（发展型）、32.46 μg/m^3（均衡型），均小于国家空气质量二级标准限值35 μg/m^3，达到控制目的。

5 结语

本文构建了一种新的区域大气复合污染多目标优化控制模型，并结合多目标优化进化算法和基于决策者偏好的多属性决策技术，来寻找大气复合污染最优控制策略。本文设计了一个虚拟案例，展示了该技术方案的可行性和有效性。与传统大气污染单目标优化控制技术相比，本文构建的模型和技术方案，能够在国控点年污染物年均浓度达标的前提下，同时兼顾排污治理成本和行业可持续性发展这两种在一定程度上互斥的目标，更加符合大气复合污染治理的复杂性和当前管理决策目标多样化的特点。

优化和决策过程一般有3种搭配方式：先决策后优化、先优化后决策、边决策边优化（Wang et al.，2017）。经典的多目标优化转化为单目标优化问题的寻优方法，就是利用先决策再优化方式，这种方法的弊端是不容易从整体上把握优化解的好坏。本文采用的是先优化，再决策的方式，这是目

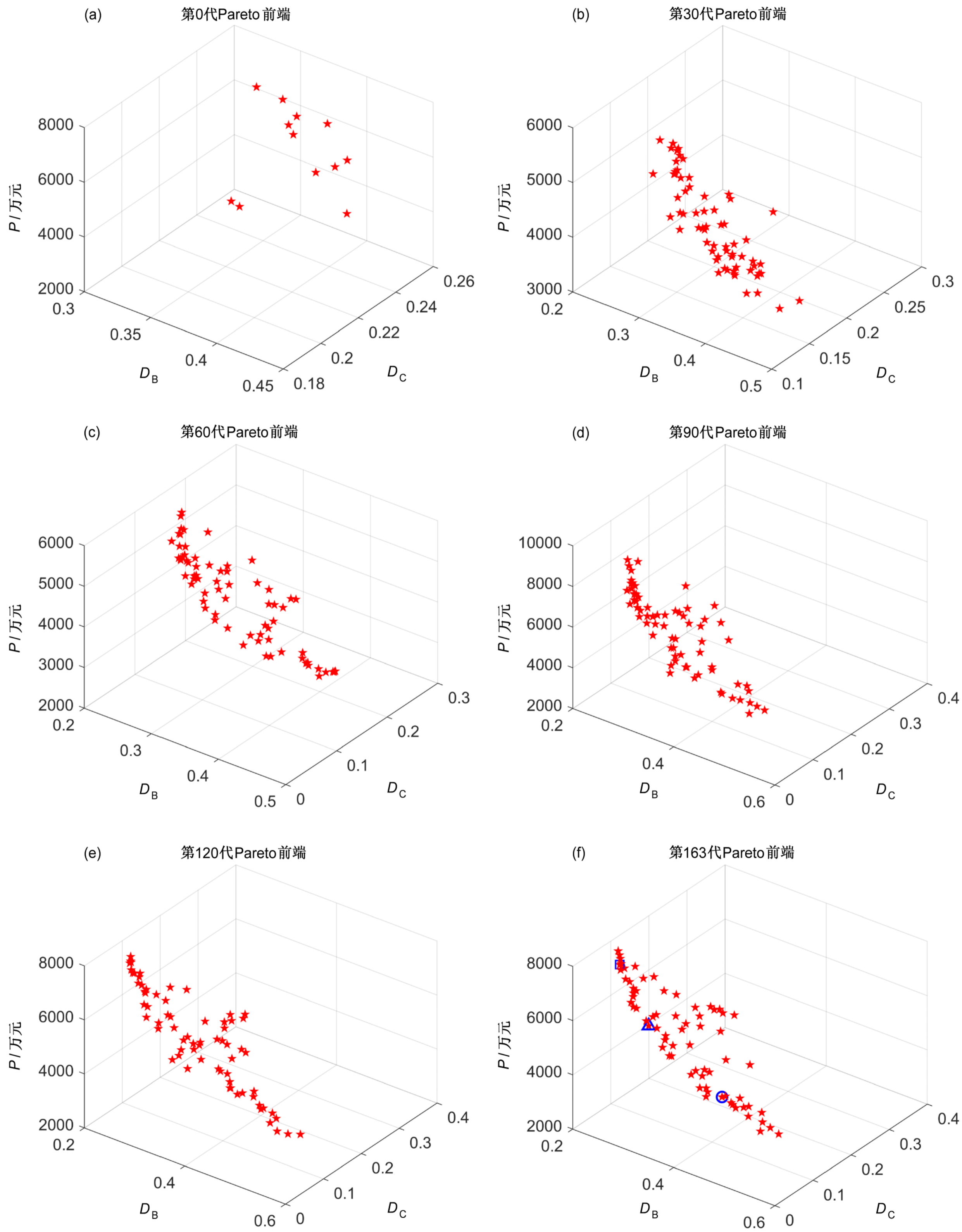

图2　不同迭代次数下的Pareto前端。在第163代Pareto前端中，标示出了3种偏好情景对应的Pareto前端位置：发展型（方形）、成本型（圆形）、均衡型（三角形）

Fig. 2　Pareto fronts with increasing generations. At Generation 163, Pareto sets with three kinds of preference, namely, square (development-type), circle (cost-type), and triangle (balance-type), are also shown

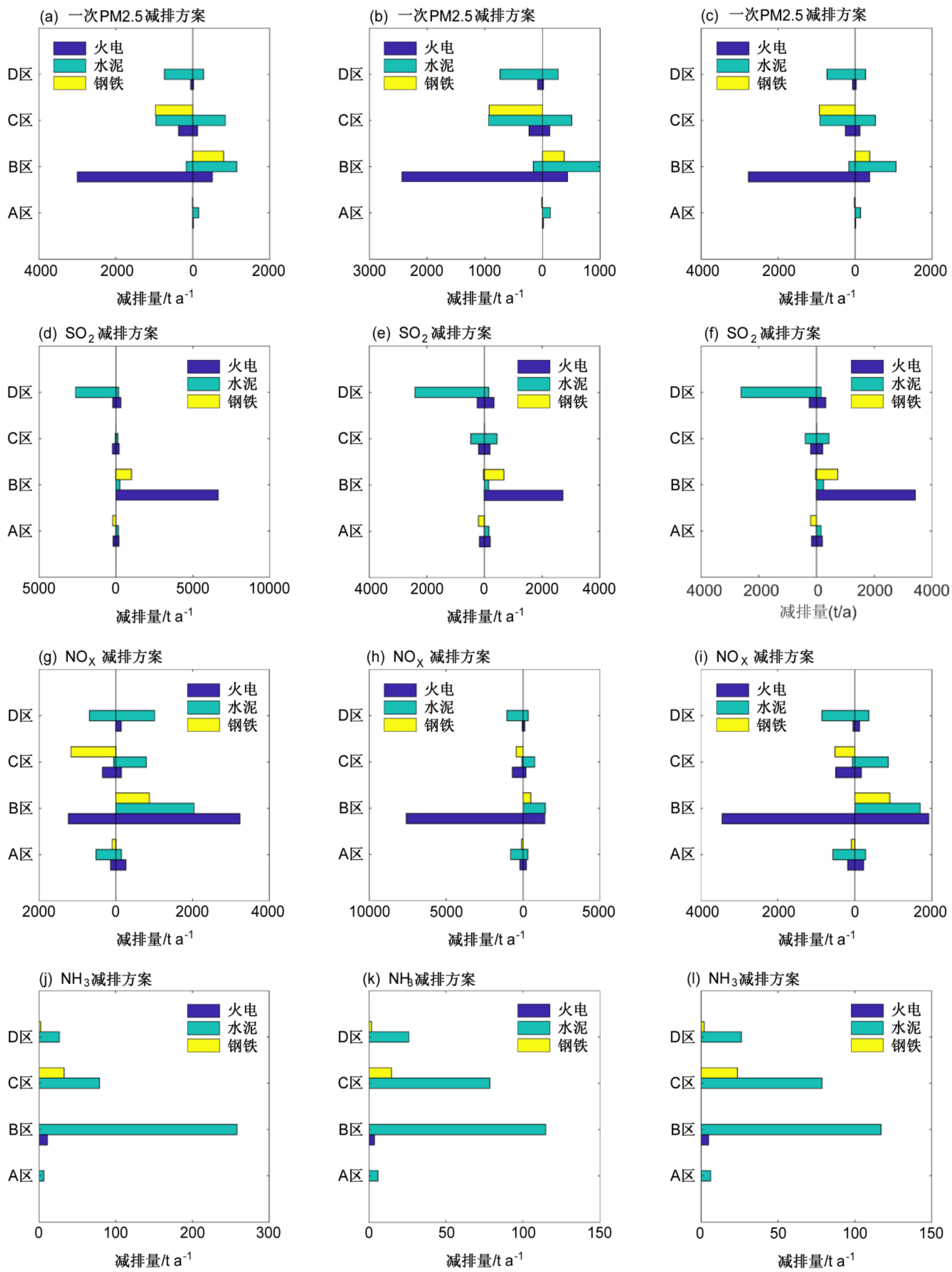

图3 3种偏好情景下的（a、b、c）一次PM2.5、（d、e、f）SO_2、（g、h、i）NO_x、（j、k、l）NH_3减排策略：（a、d、g、j）成本型；（b、e、h、k）发展型；（c、f、i、l）均衡型。图a至i中，垂直线左侧是加装环保设备的减排措施，右侧是限产的减排措施

Fig. 3 Reduction strategies of (a, b, c) primary PM2.5, (d, e, f) SO_2, (g, h, i) NO_x, and (j, k, l) NH_3 for the three kinds of preference: (a, d, g, j) Cost-type; (b, e, h, k) development-type; (c, f, i, l) balance-type. In (a)–(i), emission reductions by using environmental protection devices and by cutting production are shown on the left and right of the vertical line, respectively

前大多数多目标优化决策问题所采用的方式。这种方式能从总体上看到所有非劣解的分布情况，但其决策过程和寻优过程是独立的，决策过程没有充分利用到Pareto解集的信息。在边优化边决策的交互式方式中，决策者根据Pareto解集的信息，适当调整自己的偏好，使得最优解更加契合决策者的偏好。如何将交互式优化技术融入到大气复合污染多目标优化策略技术中，将是区域大气污染优化控制的重要发展方向之一。

参考文献（References）

Brans J P, Mareschal B. 2005. Promethee Methods[M]//International Series in Operations Research & Management Science. New York: Springer-Verlag, : 163−186. doi:10.1007/0-387-23081-5_5

陈红岩, 胡非, 曾庆存, 等. 1998. 大气环境污染优化控制的实际问题[J]. 气候与环境研究, 3(2): 68−77. Chen Hongyan, Hu Fei, Zeng Qingcun, et al. 1998. Some pracitcal problems of optimizing emissions from pollution sources in air[J]. Climatic and Environmental Research, 3(2): 68−77. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.1998.02.10

Corne D W, Jerram N R, Knowles J D, et al. 2001. PESA-II: Region-based selection in evolutionary multiobjective optimization[C]// Proceedings of the 3rd Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation,: 283−290.

柴发合, 陈义珍, 文毅, 等. 2006. 区域大气污染物总量控制技术与示范研究[J]. 环境科学研究, 19(4): 163−171. Chai Fahe, Chen Yizhen, Wen Yi, et al. 2006. Study for regional air pollutants total amount control technologies and demonstration[J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 19(4): 163−171. doi:10.13198/j.res.2006.04.165.chaifg.031

Chan C K, Yao X H. 2008. Air pollution in mega cities in China[J]. Atmospheric Environment, 42(1): 1−42, doi: 10.1016/j. atmosenv. 2007.09.003

Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Trans. Evol. Computat., 6(2): 182−197. doi:10.1109/4235.996017

Figueira J, Mousseau V, Roy B. 2005. Electre methods[M]// International Series in Operations Research & Management Science. New York: Springer-Verlag,: 133−153. doi:10.1007/0-387-23081-5_4

方叠, 钱跃东, 王勤耕, 等. 2013. 区域复合型大气污染调控模型研究[J]. 中国环境科学, 33(7): 1215−1222. Fang Die, Qian Yuedong, Wang Qingeng, et al. 2013. An optimization model for regional complex air pollution control[J]. China Environmental Science (in Chinese), 33(7): 1215−1222.

Gorr L, Gustafson S, Kortanek O. 1972. Optimal control strategies for air quality standards and regulatory policy[J]. Environ Plan A, 4(2): 183−192. doi:10.1068/a040183

公茂果, 焦李成, 杨咚咚, 等. 2009. 进化多目标优化算法研究[J]. 软件学报, 20(2): 271−289. Gong Maoguo, Jiao Licheng, Yang Dongdong, et al. 2009. Research on evolutionary multi-objective optimization algorithms[J]. Journal of Software (in Chinese), 20(2): 271−289. doi:10.3724/SP.J.1001.2009.03483

Hwang C L, Yoon K. 1981. Methods for multiple attribute decision making[M]//Multiple Attribute Decision Making. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 58−191. doi:10.1007/978-3-642-48318-9_3

贺克斌, 杨复沫, 段凤魁, 等. 2011. 大气颗粒物与区域复合污染[M]. 北京: 科学出版社, 452pp. He Kebin, Yang Fumo, Duan Fengkui, et al. 2011. Atmospheric Particulate and Regional Compound Pollution (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 452pp.

胡炳清, 柴发合, 赵德刚, 等. 2015. 大气复合污染区域调控与决策支持系统研究[J]. 环境保护, 43(5): 43−47. Hu Bingqing, Chai Fahe, Zhao Degang,et al. 2015. Study on the regional control and decision support system of complex air pollution[J]. Environmental Protection (in Chinese), 43(5): 43−47. doi: 10.14026/j. cnki. 0253-9705.2015.05.008

黄顺祥. 2018. 大气污染与防治的过去、现在及未来[J]. 科学通报, 63(10): 895−919. Huang Shunxiang. 2018. Air pollution and control: Past, present and future[J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 63(10): 895−919, doi:10.1360/N972017-01271.

IIASA. 2009. GAINS Online: Tutorial for advanced users [R]. Downloadable at http://www. iiasa. ac. at/web/home/research/researchPrograms/air/GAINS.html.

Ji P, Jiang R. 2003. Scale transitivity in the AHP[J]. Journal of the Operational Research Society, 54(8): 896−905. doi:10.1057/palgrave.jors.2601557

焦李成, 尚荣华, 马文萍, 等. 2010. 多目标优化免疫算法、理论和应用[M]. 北京: 科学出版社, 305pp. Jiao Licheng, Shang Ronghua, Ma Wenping, et al. 2010. Multi-Objective Optimization: Immune Algorithm, Theory and Applications (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 305pp.

Lootsma F A. 1993. Scale sensitivity in the multiplicative AHP and SMART[J]. J. Multi-Crit. Decis. Anal., 2(2): 87−110. doi:10.1002/mcda.4020020205

刘峰, 黄顺祥. 2011. 大气环境风险控制的优化理论与应用[M]. 北京：气象出版社，168pp. Liu Feng, Huang Shunxiang. 2011. Optimal Theory of Atmospheric Environment Risk Control and Its Applications (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 168pp.

刘峰, 胡非, 朱江, 等. 2004. 大气污染优化控制理论的一些新进展[J]. 世界科技研究与发展, 26(6): 7−14. Liu Feng, Hu Fei, Zhu Jiang, et al. 2004. Some new progresses in the theory for optimal control of atmospheric pollution[J]. World Sci-Tech R & D (in Chinese), 26(6): 7−14. doi:10.3969/j.issn.1006-6055.2004.06.002

雷德明, 严新平. 2009. 多目标智能优化算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社，389pp. Lei Deming, Yan Xinping. 2009. Multi-Objective Intelligent Optimal Algorithm and Applications (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 389pp.

劳苑雯, 朱云, Jang C, 等. 2012. 基于响应面模型的区域大气污染控制辅助决策工具研发[J]. 环境科学学报, 32(8): 1913−1922. Lao

Yuanwen, Zhu Yun, Jang c,et al. 2012. Research and development of regional air pollution control decision support tool based on response surface model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 32(8): 1913−1922. doi:10.13671/j.hjkxxb.2012.08.019

Ma D and Zheng X. 1991. 9/9-9/1 Scale method of AHP [C]// Proceedings of the Second International Symposium on the AHP. Pittsburg: University of Pittsburg, 197−202.

Salo A A, Hämäläinen R P. 1997. On the measurement of preferences in the analytic hierarchy process[J]. J. Multi-Crit. Decis. Anal., 6(6): 309−319, doi: 10.1002/(sici)1099-1360(199711)6: 6<309: aid-mcda163>3.3.co;2-u

Saaty T L. 2008. Decision making with the analytic hierarchy process [J]. IJSSCI, 1(1): 83. doi:10.1504/ijssci.2008.017590

Teller A. 1968. The use of linear programming to estimate the cost of some alternative air pollution abatement policies [C]// Proc. IBM Scientific Computing Symp. on Water and Air Resource Management, 345−353.

Wang H D, Olhofer M, Jin Y C. 2017. A mini-review on preference modeling and articulation in multi-objective optimization: Current status and challenges[J]. Complex Intell. Syst., 3(4): 233−245. doi: 10.1007/s40747-017-0053-9

薛文博，王金南，韩宝平，等. 2017. PM2.5输送特征与环境容量模拟[M]. 中国环境出版社, 193pp.　Xue Wenbo, Wang Jingnan, Han Baoping, et al. 2017. Modeling Simulation of PM2.5 Transport Characteristics and Its Environmental Capacity (in Chinese) [M]. China Environmental Science Press, 193pp.

杨保安, 张科静. 2008. 多目标决策分析: 理论、方法与应用研究[M]. 上海: 东华大学出版社, 228p.　Yang Baoan, Zhang Kejing. 2008. Multi-Objective Decision Analysis: Theory, Methods and Applications (in Chinese) [M]. Shanghai: Donghua University Press, 228pp.

曾庆存. 1996. 自然控制论 [J]. 气候与环境研究, 1(1): 3−8, 62. Zeng Qingcun. 1996. Natural cybernetics [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 1(1): 3−8, 62. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.1996.01.02

朱江, 曾庆存. 2002. 控制大气污染的一个数学理论框架[J]. 中国科学D辑, 32(10): 864−870.　Zhu Jiang, Zeng Qingcun. 2002. A mathematical theoretical frame of air pollution control [J]. Science in China (Series D) (in Chinese), 32(10): 864−870. doi: 10.3969/j.issn.1674-7240.2002.10.011

Zitzler E, Laumanns M, Thiele L. 2002. SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm [C]// Giannakoglou K, Tsahalis D T, Periaux J, et al , Eds. Evolutionary Methods for Design, Optimization and Control with Applications to Industrial Problems. Berlin: Springer-Verlag, 95−100.

张远航. 2008. 大气复合污染是灰霾内因 [J]. 环境, 7: 32−33. Zhang Yuanhang. 2008. Atmospheric compound pollution is the internal cause of haze [J]. Environment (in Chinese), 7: 32−33.