
参赛队员： 曹政、贺芃皓、朱逸飞

学校： 山东省青岛第二中学

省份： 山东省

国家/地区： 中国

指导老师： 闫超

论文题目： 华北某市大气污染最优化治理方案

华北某市大气污染最优化治理方案

摘要

绿水青山就是金山银山是十九大报告中的重要的理念,节省资源和爱护环境是基本国策,华北地区城市污染源企业进行产业结构升级和企业转型的正走在自我探索的道路上。为促进经济发展,提升大众生活水准,本文将经典的讲述经济增长与环境治理关系的库兹涅兹理论(EKC 曲线)与华北地区某城市实际情况相结合,首先从该市经济发展和环境问题的现实情况出发,深入分析两者的关系,用计量经济学模型在环境库兹涅兹倒 U 型曲线的基础上进行修正。以该市 1991-2018 年的经济和环境的数据作为样本,选择单位 GDP 大气污染物排放量为指标,描绘出时间序列图对经济的影响。环境质量态势进行描述;分析该市经济与环境的关系,得出曲线图,并且利用经济学理论探讨其内在成因,并对结果作出修改。

为了进一步详细了解华北某市具体污染状况,我们对所调查的区域污染物取样、编号,用 GPS 获得区域的地理位置。利用专属仪器,得到了样本所含的每种气体污染物的浓度数据,利用主成份分析和一些分析去解析大气污染物和典型污染物的源头和种类。通过对采样数据来分析 5 个地点的 8 种典型污染物的源头,并对 5 个地点调查关联性强的其他地方。最后结合大气污染的传播特征形式,求解非稳态对流扩散方程得出整个城区不同污染物的浓度时空分布,进而找出该城市 8 个典型污染物的源头位置和所属区域。

针对本文涉及的各个大气污染物采样点所属区域进行行业分类,通过计量分析和投入产出分析方法建立行业影响关系矩阵,反应这 5 个区域各个行业的相生相依的关系。通过投入产出模型,将污染物的排放视作产出,辨析出急需调整、治理的高污染高排放型企业及其上下游产业链相关部门。基于完全产污系数矩阵根据采样数据中各个污染源直接排污量找出各个部门所产生的或者潜在的排污量,合理估计完全排污量,进而评估对整个城市 GDP 总产值的冲击,为该市污染治理方案优化模型的 建立和治理规划以及经济控制等从经济学产业影响关系角度提供依据。

最后,通过定量分析显示出高污染部门并基于灵敏度分析评估污染治理对 GDP 的影响,为污染治理确定方向。采用目标优化方法提出最优化治理方案,基于环境污染指数 PLI 与 GDP 总产值为衡量指标的优化函数,分析 GDP 与各个污染物的交叉弹性以及对其变量变化的敏感程度,找出城市污染指数相对较高同时对 GDP 冲击相对较小的污染物类型作为优先考虑治理对象,对各种污染物治理进行排序,揭示其对应的潜在污染产业,并对各产业部门污染状况做出评价,以此提出最优化治理以及产业转型升级建议方案,为该市提出促进经济增长改善环境质量的可持续发展合理性建议。

关键词: 大气污染 EKC 曲线 污染指数 主成份分析 灵敏度分析 最优化治理

Optimal Control Plan of Air Pollution in a City of North China

ABSTRACT

According to the report of the 19th national congress, we should establish and implement the concept that lucid water and lush mountains are invaluable assets, adhere to the basic state policy of resource conservation and environmental protection, and urban polluters in north China are on the road of self-exploration in industrial structure upgrading and enterprise transformation. To promote the development of the urban economy, improve residents' living standards, this paper will describe the relationship between economic growth and environmental control of the library kuznets's theory (EKC curve), and combining the actual situation of a certain city in north China, first of all, from the city's economic development and the reality of environmental issues, in-depth analysis of the relationship between the two, using the econometric model in the library environment kuznets inverted u-shaped curve on the basis of correction. Taking the economic and environmental historical data samples of the city's economy from 1991 to 2018, select the emission of air pollutants per unit GDP as the index, and draw a time series graph for economic growth. Description of environmental quality situation; Econometric analysis of the relationship between the city's economic growth and environmental quality, the environmental and economic growth curve is obtained in line with the actual situation, and through the analysis of the internal causes of economic theory, the empirical results are revised.

In order to further understand the specific pollution situation of a city in north China, we sampled and numbered the urban pollutants we investigated, and recorded the location of sampling points with GPS. The concentration data of various kinds of air pollutants in each sample were obtained by using special instruments, and the sources and types of typical air pollutants were analyzed by correlation analysis and principal component analysis. Through the analysis of sampling data, these statistical analysis methods are comprehensively used to analyze the sources of 8 kinds of typical pollutants in 5 different regions, and search for highly correlated regions in 5 different regions. Finally, combining with the propagation characteristics of air pollution, the unsteady convective diffusion equation is solved to obtain the spatial and temporal distribution of the concentration of different pollutants in the whole urban area, so as to find out the source location and region of the eight typical pollutants in the city.

According to the industry classification of each air pollutant sampling point involved in this paper, an industry influence matrix is established by means of econometric analysis and input-output analysis to reflect the interdependence among the industries in the five regions. Through the input-output model, the pollutant discharge is regarded as output, and the high-pollution high-emission enterprises in urgent need of adjustment and treatment and the relevant departments of the upstream and downstream industrial chain are identified. Based on the total production of coefficient matrix according to the sampling data of various pollution sources in the direct position or potential emissions generated by each department and reasonable estimate emissions, completely, in turn, the impact assessment for the whole city GDP output value, for the city's pollution control plan optimization model for the establishment and management of the planning and control the economy from the perspective of relationship between the industrial economics provides the basis.

Finally, high pollution sectors are shown through quantitative analysis and the impact of pollution control on GDP is assessed based on sensitivity analysis to determine the direction for pollution control. Target optimization method optimization control scheme is put forward, based on the environmental pollution index PLI with GDP output value as the measure of optimizing function, analysis of GDP and cross elasticity of various pollutants, and changes of pollutants variables sensitivity, find out the urban pollution index is relatively high and impact on GDP is relatively small as priority pollutants types of governance object, for a variety of contaminants to sort, reveals the corresponding potential pollution industries, and make evaluation of each industrial sector pollution situation, to put forward a proposal optimization management and industrial transformation and upgrading, Put forward sustainable development reasonable Suggestions to promote economic growth and improve environmental quality for the city.

Key words: air pollution, EKC curve, pollution index, principal component analysis, sensitivity analysis, optimal solution

目录

1.研究背景	1
1.1 大气污染的害处、发展状况和成因分析	1
1.2 关于环境污染和经济发展的关系及本文经济学研究的意义	2
1.3 本文研究内容和研究思路	3
2.问题分析	4
2.1 整体思路	4
2.2 大气污染物浓度布局及不同区域污染程度的分析	4
2.3 典型污染物的相关性考量及来源.....	5
2.4 污染源定位.....	5
2.5 各产业部门影响关系矩阵和投入产出分析.....	5
2.6 最优化治理方案分析.....	5
3.问题假设	7
4.符号说明	8
5.模型的建立与求解	9
5.1 环境与经济之间的理论关联: 库兹涅茨曲线(EKC).....	9
5.2 华北某市经济与大气污染计量模型分析	10
5.3 大气污染物空间分布.....	13
5.3.1 城市地形和各种污染物浓度的时空布局.....	13
5.3.2 大气污染负荷指数法模型.....	15
5.4 8种大气污染物相关性分析及来源	17
5.4.1 相关分析模型.....	17
5.4.2 大气污染物的主成分分析.....	18
5.5 大气污染物扩散传播规律.....	23
5.5.1 二维非稳态对流扩散模型的建立.....	23
5.5.2 污染源的确定.....	23
5.6 大气污染物最优化治理方案.....	26
5.6.1 华北某市大气污染治理的投入产出矩阵分析.....	26
5.6.2 基于污染指数时空演变模拟的单个大气污染物优化减排方案分析.....	28
5.6.3 污染整体方法分析.....	40
5.7 基于研究分析的治理建议.....	42
6.模型的评价	44
6.1 模型优点:	44
6.2 模型缺点:	44
参考文献	45
附录:	46
致谢	74

1.研究背景

1.1 大气污染的害处、发展状况和成因分析

近年来,随着我国城镇化的迅猛成长,城镇人口显著提高,人类的生产生活对地区整体环境质量有着越来越多的影响。其中,大气污染因其分布广泛性、影响严重性、治理复杂性、持续长期性等特点引起了人们的广泛关注。因此,对城市大气环境异常情况的监测,以及应用监测数据进行城市空气质量评价,进一步研究大气污染的最优化治理方案,逐渐成为人们所关注的焦点。

(1) 雾霾的危害

1. 雾霾对人身健康的影响。雾霾的成分极度繁杂,其中有上百个大气颗粒物。这里面,有害健康的主要是直径小于10微米的气溶胶粒子,它能附着在人体呼吸道和肺叶中,引发鼻、支气管炎等症状,长久的在有害环境下还会引发肺癌。雾和霾还会导致冷刺激,比如血管痉挛、心脏负荷大等[3]。

2. 雾霾对交通运输的影响。比较频发的有大雾对交通的影响,因为浓雾导致高速、民航机场封路和停班的状况非常多,甚至还导致恶性交通事故。而在城市交通中,因大雾会使城市早晚高峰期的流量增加 大约 20%,同时事故也上升大约 30% 。

3. 雾霾对电力设施的影响。大雾也是使得电力发生事故的原因之一。在输电当中,绝缘体的表面若有非常多的雾滴会减少绝缘的机能和安全系数,使高压线容易跳闸或短路。

4. 雾霾对农业生产的影响。雾天对于农业的害处主要有:光合作用减小,光照时间变短。在一般情况下,雾天会让光热资源不够使用,会使得光照时间减少 3~4 小时,甚至 6~8 小时,急剧降低了光合产物。[1]

(2) 雾霾发展现状

据天气后报网站数据统计[2],从 2019 年 1 月 1 日到 31 日,北京市空气质量指数 AQI 仅有 9 天属于“优”等级。对于同期全国城市的总体空气质量状况,根据监测站发布的《2019

年1月全国城市空气质量报告》[3],2019年1月168个城市质量优良的天数比例为51.1%,降低了6.9%。按照《环境空气质量标准》(GB3095-2012),2019年1月,中国337个城市质量优良的天数比例为67.6%,轻度的比例为17.9%,中度的比例为7.4%,重度及以上的比例为7.1%。

(3) 基于既有文献的雾霾成因分析

华北地区的雾霾形成有空气扩散速率慢和污染源集中双重因素。从自然扩散层面而言,由于东部区域冷空气弱,因此华北区域对大气层的扰动较小,大气相对平稳;又因为一些区域受降水和蒸发的影响,空气湿度大,所以也进一步阻碍了自然扩散进程。在平稳的大气水平下,污染物在大气的水平或者垂直上都很难向外扩散。换言之,由自然原因使得污染物累计导致污染更加剧烈。从人为因素而言:当前,华北地区,重点为环渤海区域的人口比较多,另外此区域又有很多中国资源型企业,因此雾霾的产生非常集中,污染情况十分惨重[4]。

华北区域雾霾现象逐渐加剧,导致大众健康、工作和生活受到威胁,大众需要雾霾治理。因此,此文选择以华北某典型雾霾城市作为研究对象。

1.2 关于环境污染和经济发展的关系及本文经济学研究的意义

污染与经济之间的关系可通过环境库兹涅茨曲线(EKC)体现[6]。EKC是环境与经济的一种假设关联:随着现代经济的发展,环境的各种指标会先好后坏。即在发展经济的开始时期,经济水平低,污染也低;而在经济成长当中,资源的消耗加剧,污染水平逐渐增高;在经济发展后期,经济结构改变,环保理念增强,环境得到改进。在二维坐标系中,通常用横轴代表经济指标(如GDP),纵轴代表污染指标(如废物排放量),EKC通常体现为倒U型和N型[6.6]。

本文中的经济学研究部分拥有实际意义和理论意义:

(1) 现实意义

本文研究过去经济增长与环境污染的发展历程的历史数据,对比该市的数据,识别辨析出该市的所属的曲线模式,并根据实际情况、国情为实现可持续提出合理的建议。在

发展中的国家,经济与环境的冲突更加尖锐,因此更需要合理的保护环境策略。既要“金山银山”,也要“绿水青山”。只有经济和环境相互完善,才能促成可持续发展。

(2) 理论意义

当前,全球关于环境与经济之间关系的研究是基于环境库兹涅茨曲线,而该曲线被证明在人均收入分配方面不适用于发展中国家的所有情况。

首先,本文通过计量模型,验证并修正 EKC 曲线在我国华北某市(发展中国家城市)的变化特征,旨在拓展该曲线的适用范围。

其次,利用投入和产出来调查部门之间的关联,算出每个部门所产生的排污量,从而可以从定量方面显示出,高污染产业部门以及下游以其为原料的产业链相关部门及行业。

再次,用主成分分析找出列昂涅夫逆矩阵反映出各部门产物水平的主因子,进一步的对投入产出模型的结果进行计量分析,对于验证投入产出分析得出结论的合理性与实践性具有很强的指导意义。

1.3 本文研究内容和研究思路

大气污染主要有燃料燃烧的排放量,生产工艺的排放量,工业二氧化硫,工业粉尘和烟尘以及农业和居民生活废气,这些污染气体种类繁多。按照性能区分,城区可分为生活、工业、山区等,分别记为 1 类区、2 类区、……、5 类区,区域环境受活动影响的程度不一样。因此,让华北某市的城区分为间距大约 1 公里的网格子,对该区域污染物进行取样、编号, 并用 GPS 记录采样点的位置。用专属仪器检测,得到了各个小样所含的每种气体污染物的浓度数据(本文讨论的大气污染物主要为 8 种典型的污染气体: CO、NO、SO₂、NO₂、O₃、PM10、PM2.5、挥发性有机物 VOC)。另外,按照 2 公里的距离在那些远离大众及工业区的地方取样,使其作为该区大气环境的背景值。样本采点分布以及各功能区污染物浓度的统计见附录 1。

为了更好的治理华北某市的环境污染,本文从该市的经济发展和环境问题的现实情况出发,多方面立体化的分析了两者的关系:

首先,在时间维度上,通过 GDP 作为变量的污染物多元主成分分析对库兹涅茨倒 U 型曲线进行实践性修正,确认环境和经济是怎样相生相依的变化特征。以该市 1991-2018 年的经济发展和环境污染数据作为样本,以真实 GDP 作为经济发展的评价指标,对两者的关系进行计量分析,绘制出现实情况下的相关性曲线,并通过经济学理论基础进行理论化分析,并将结果合理化修正。

其次,根据投入产出模型分析找出各部门之间的潜在关系,计算出实际及潜在的污染量,定量的具体显示出高污染产业及高污染产业所属的产业链上下游,对产业结构优化的对象有更明确的分析,更高效更低成本的推进和改进产业结构。

再其次,用主成分分析找出列昂涅夫逆矩阵反映出各部门产物水平的 3 个主因子,进一步的对投入产出模型的结果进行计量分析。

最后,基于环境污染指数与GDP总产值为衡量指标的优化函数,提出最优化治理方案以及产业转型升级建议方案。

2.问题分析

2.1 整体思路

首先分析了 EKC 曲线与现存学说,使用计量经济学模型在环境库兹涅兹倒 U 型曲线上作出修改。以该市 1991-2018 年的经济和环境样本,选择单位 GDP 大气污染物排放量,画出时间序列图描述经济和环境态势;计量分析该市经济与环境的关系,得出曲线,并且运用经济学理论讨论其内在成因并对结果做出修改。

2.2 大气污染物浓度布局及不同区域污染程度的分析

用附件 1 的数据可求出该城区状貌,并使用三维插值法计算出 8 种大气污染物分布并分别查出各自的领域。

使用最高污染系数分别得出 8 种大气的各自污染系数,然后得出 319 个地点的污染程度。根据污染程度对 5 个不同区域进行全面的考量。

2.3 典型污染物的相关性考量及来源

考量大气污染的主要原因既为研究主要来源,同一个活动可以产生许多污染物,同一种污染物也有不同来源。相关分析和主成份分析是检测污染物来源和类别的方法。分析 5 个地区的 8 种典型污染物的来源,而后归纳 5 个地区的来源分析出华北某市大气污染的主要原因。

2.4 污染源定位

由于污染源在不同区域有一个直接影响值,在污染源较多的区域中,要找出最好的模型污染源是很艰难的,而且在数据处理的时候还要思考传播途径的迁移方式和大气降沉方式,总体思量该区域的污染源便十分艰难。结合大气污染的传播特征形式,求解非稳态对流扩散方程得出整个城区不同污染物的浓度时空分布,进而找出该城市 8 个典型污染物的污染源位置和所属区域。

2.5 各产业部门影响关系矩阵和投入产出分析

针对本文涉及的各个大气污染物采样点所属区域分类,分别为生活区、工业区、山区、交通区、农田区,与此对应相关产业可进行归类为 5 个行业,依次为:餐饮业、重工业、旅游业、交通业和农业。首先基于环境污染两个重要概念,即直接产污系数和完全产污系数的矩阵,根据投入产出思考方法建立行业影响关系矩阵,反应这 5 个系统各个行业之间的相互依存关系,基于完全产污系数矩阵根据各个污染源直接排污量合理估计完全排污量,进而评估对整个城市 GDP 总产值的冲击,为该市污染治理方案优化模型的建立和治理规划以及经济控制等从经济学产业影响关系角度提供依据。

2.6 最优化治理方案分析

利用目标优化提出最优化治理方案,构建污染物对流扩散数学模型刻画 8 种典型污染物的时空分布,基于环境污染指数 PLI 与 GDP 总产值为衡量指标的优化函数,分析 GDP 与各个污染物的交叉弹性以及对污染物变量变化的敏感度,找出城市污染指数相对较高同时对 GDP 冲击相对较小的污染物类型作为优先考虑治理对象,对各种污染物治理进行排序,揭示其对应的潜在污染产业,并对各产业部门污染状况做出评价,以此提出最优化治理方案以及产业转型升级建议方案。

3.问题假设

- 1.该城区城市布局合理;
- 2.该区域大气污染物的源头不被其他地区影响,来源可信并精准;
- 3.假定不同的采样地点皆能体现出该平方公里的情况;
- 4.污染物的排放速率恒定,并基于年度总排放量确认;
- 5.大气是非稳态的,服从传播扩散定律;
- 6.不考虑大气污染物的沉降;

4. 符号说明

CF_i : 污染物的最高污染系数;

C_i : 污染物 i 的实测含量;

C_{0i} : 污染物 i 的评价标准, 即背景值。

PLI : 污染负荷指数;

M_i : 污染源 i 排放量;

m_i : 污染源 i 减排量;

ΔS : 污染源面积;

v_x : 污染源水平方向传播速度;

v_y : 污染源竖直方向传播速度;

d_x : 污染源水平方向扩散系数;

d_y : 污染源竖直方向扩散系数;

t : 预测时间;

X_i : 污染物 i 的体积排放量;

Y_i : 污染物 i 的质量排放量;

z : 污染物主成分变量;

A : 直接排污系数矩阵;

B : 总排污系数矩阵。

5.模型的建立与求解

5.1 环境与经济之间的理论关联：库兹涅茨曲线(EKC)

环境库兹涅茨曲线是由美国学家 1992 年根据经验数据提出的概念[6]。它假设国家的污染程度会随着经济和收入发展而上升,之后则随着收入的上升而下降;而在经济的高速成长时间段,经济结构被改善,污染产业停产或被移动,经济的积累用于环境水平的提升,环保思想增强,因此环境也开始好转。在二维坐标系中,用横轴表示经济的指标(GDP、GNP、工业总产值等),纵轴表示环境污染方面的指标(废物排放量等),也有以环境与经济的综合指标来反映环境库兹涅茨曲线的变化。污染水平与经济增长的关系通常呈现倒“U”形或“N”形, EKC 的各个形式宏观上可以用不一样的区域的环境与经济成长的阶段,水平及其协调状态的差异来解释。在二维直角坐标系里,以环境退化为纵轴,生产总值为横轴,这一假设就是倒 U 形的关系,如图 1 所示。

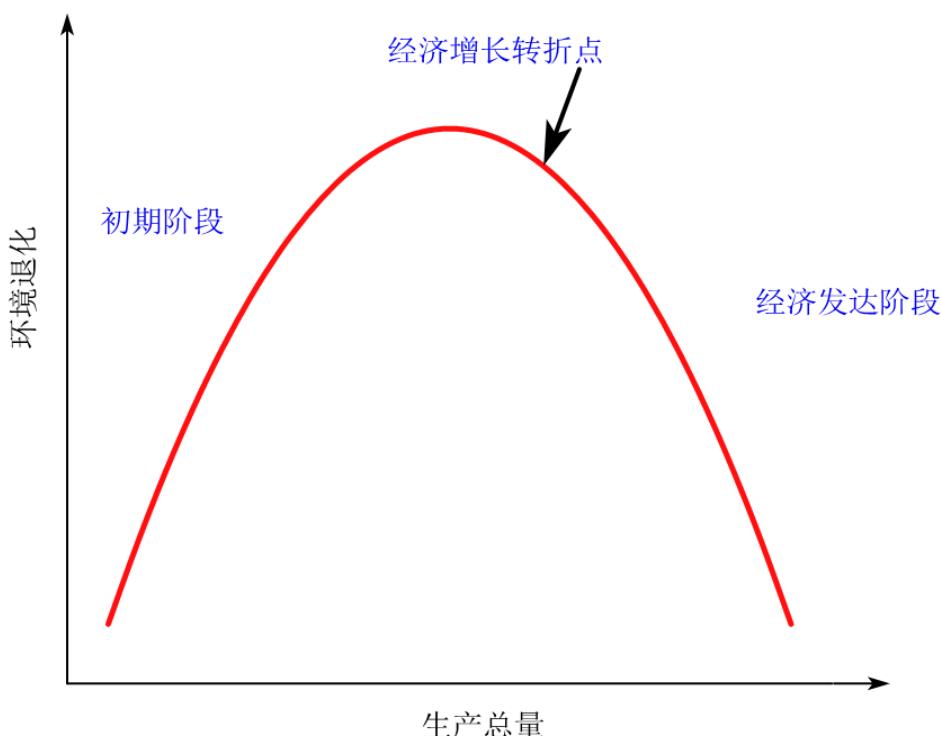


图 1 倒 U 型环境 EKC 曲线

自第一次工业革命以来,西方发达国家,由于对环境保护和工业污染缺乏清晰的认识,走上了“先污染, 后治理”的道路,直到近几十年,才开始有规划的进行污染的治理与环保

开发,使得发达国家的环境与经济契合上了 EKC 倒 U 型曲线[5]。然而, EKC 曲线只是经验曲线,是使用发达国家的数字获得的,但是对于发展中国家来说,并不能证明环境库兹涅兹 EKC 曲线也成立,所以倒 U 型曲线不能成为环境质量演进的准则。由于我国步入工业化较晚,遵循“边开发,边治理”科学原则,而没有走上传统工业国的老路[11,12],对于是否契合 EKC 曲线,没有可以寻找的理论先例,我们将通过计量模型分析对其进行验证。

5.2 华北某市经济与大气污染计量模型分析

要弄明白城市污染状况与经济的关联,首先要明白其经济的大概状况,这是本文的根本。由于从投入产出分析看出该城市的大气污染受多个产业的影响,所以对规模以上地区产业总产值的分析阐明了大气污染的内在原因也展望了经济对大气环境的影响。

表 1 华北某市规模以上产业 GDP 总产值和污染物统计

年度	GDP 总产值 (亿元)	大气污染物总排放量 (亿立方米)	单位 GDP 产值排放量 (亿立方米/亿元)
1991	14.604	4.962	0.33977
1992	17.2	4.932	0.286744
1993	23.332	5.19	0.222441
1994	31.532	5.428	0.172143
1995	29.866	5.82	0.19487
1996	31.812	6.142	0.193072
1997	36.394	6.684	0.183657
1998	38.94	6.454	0.165742
1999	43.67	6.166	0.141195
2000	56.84	6.454	0.113547
2001	65.402	6.07	0.092811
2002	72.404	5.932	0.081929
2003	88.216	6.01	0.068128
2004	114.666	6.396	0.055779
2005	138.924	7.064	0.050848
2006	113.7835	6.850838	0.060209
2007	121.3081	6.95966	0.057372
2008	128.8327	7.068481	0.054866
2009	136.3572	7.177302	0.052636
2010	143.8818	7.286124	0.05064
2011	151.4064	7.394945	0.048842
2012	158.931	7.503767	0.047214
2013	166.4556	7.612588	0.045733
2014	173.9802	7.72141	0.044381
2015	181.5048	7.830231	0.043141
2016	189.0293	7.939052	0.041999
2017	196.5539	8.047874	0.040945

2018	211.6031	8.265517	0.039061
------	----------	----------	----------

为了清楚描述该城市大气污染与经济增长的关系,图 2 反映了 GDP 与年度大气污染排放之间的关系(基于表 1 统计数据),从中可以指导,随地区产业总产值 GDP 上升很快,从 1991 年的 14.6 亿元增加到 2018 年的 211.6 亿元,大气污染物排放量有所翻倍,从 1991 年的 4.962 亿立方米增长到 2018 年的 8.26 亿标立方米。此外,图 3 表明,1991-2018 年,该市大气污染与经济的关联为 N 字型(倒 U+ U)型,即污染随经济先上升后回落,最终随经济再次增进而越发重大,而与传统的 EKC 模式出现偏离。分析原因在于该城市在经济成长过程采取了边污染边治理的模式,而不是先污染后治理的方法。因此正确的发展策略应该是走边发展边治理的道路。

基于表 1 给出的统计数据,可以进一步回归得到大气污染物排放总量 X 与规模以上产业总产值 GDP 的关系为:

$$Gp = -4.404X^3 + 97.99X^2 - 647.6X + 1359 \quad (1)$$

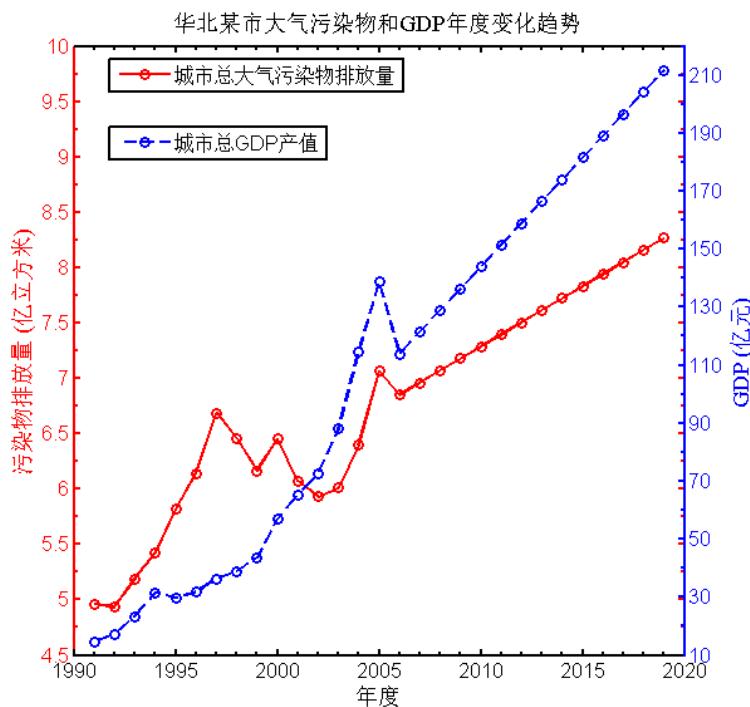


图 2. 华北某市大气污染与城市 GDP 年度变化

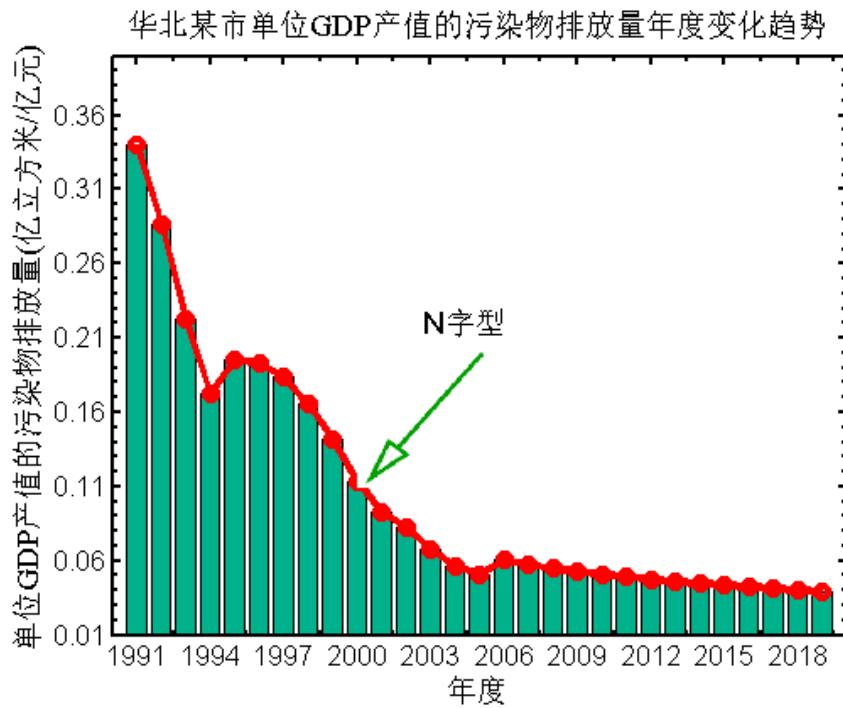


图 3. 华北某市单元 GDP 的污染物排放的年度变化

回归结果如图 4 所示,可以看出由于经济增长存在的局部 N 字型效应,拟合结果在中间段出现扰动,但总体上对于本文关心的经济增长后期阶段拟合效果很好。

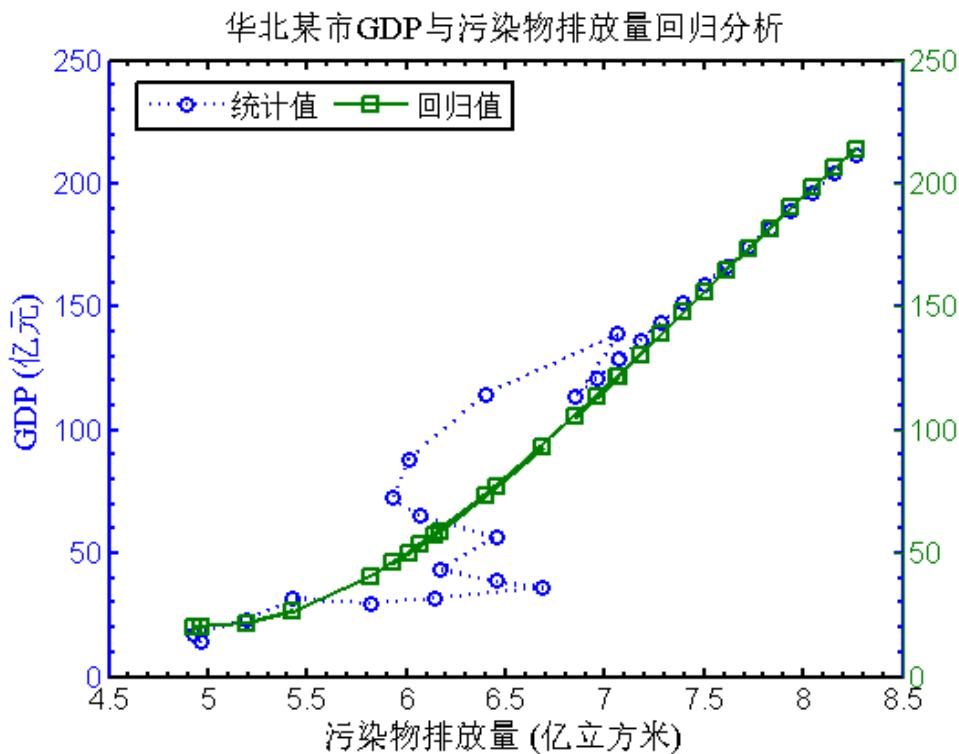


图 4. 华北某市 GDP 与污染物排放回归

为了获得污染物分项排放量数据,这里对采样点分区统计,按照面积加权方式对每一

种污染物浓度进行累加求和,基于 2018 年度总的污染物排放量(8.265517 亿立方米),得到每一种污染物排放量如表 2 所示:

表 2 华北某市典型污染物排放归类统计

污染物类型	采样均值	方差	2018 年总排放量(亿立方米)
CO (mg/m ³)	17.37	9.25	0.2356
NO (μg/m ³)	211.67	157.49	2.87
SO ₂ (μg/m ³)	214.03	280.01	2.902
NO ₂ (μg/m ³)	33.01	97.75	0.447
O ₃ (μg/m ³)	7.49	40.74	0.102
PM10 (μg/m ³)	38.84	22.37	0.5267
PM2.5 (μg/m ³)	86.43	70.08	1.172
VOC (mg/m ³)	0.31	0.51	0.0041

5.3 大气污染物空间分布

5.3.1 城市地形和各种污染物浓度的时空布局

对我们抽样的 319 个样本地址做一个三维曲线拟合得该市区的状貌,如图 5。

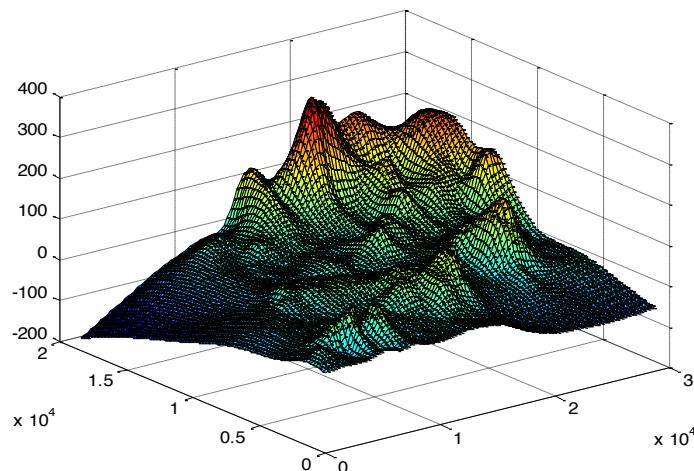
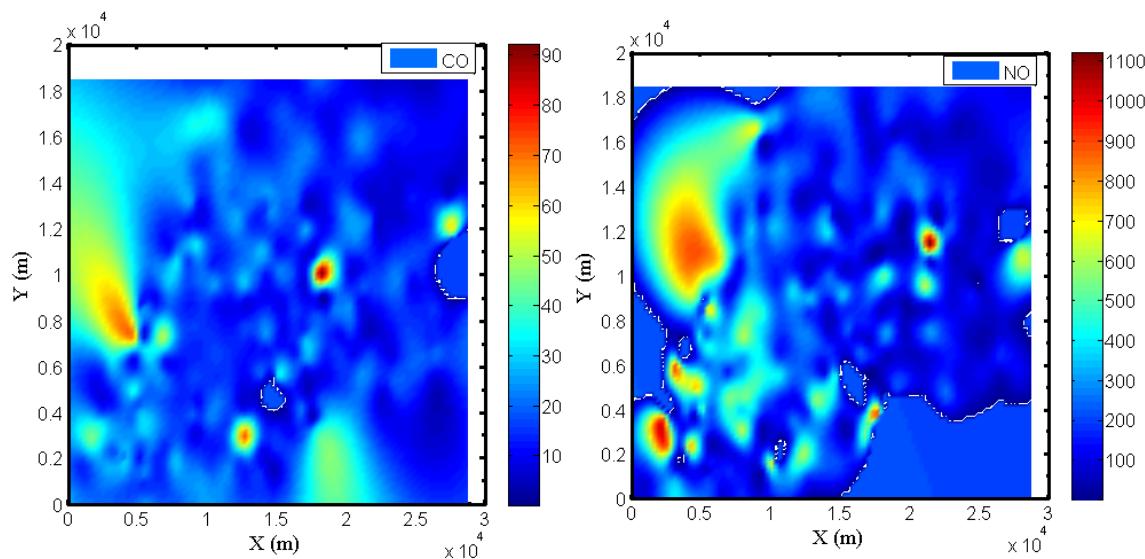
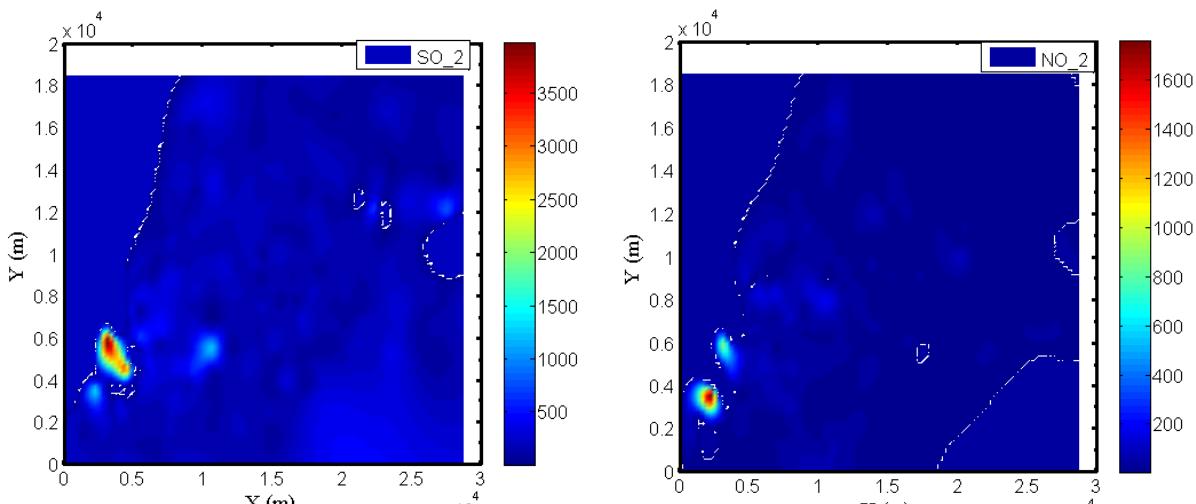


图 5 该城区状貌

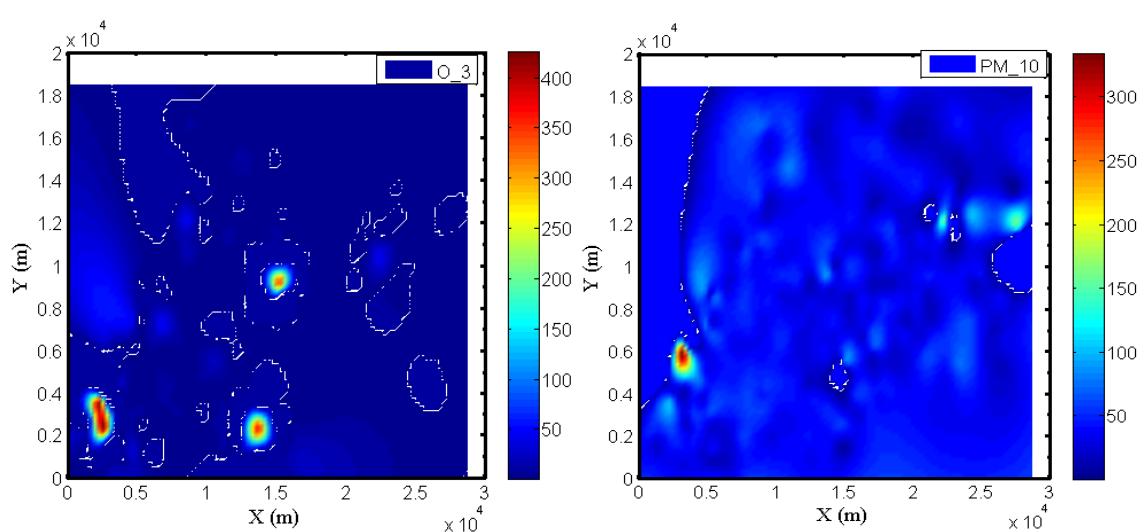
使用采样数据中的 8 种大气污染物浓度取代海拔,可得出 8 种污染物浓度的空间分布,如图 6 所示。



(a) (b)



(c) (d)



(e) (f)

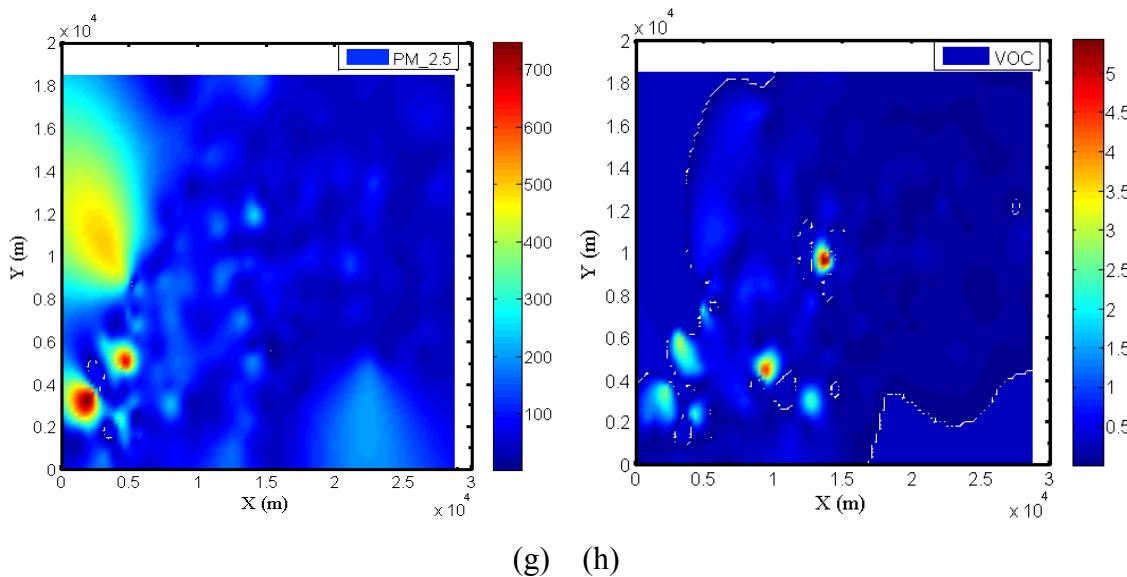


图 6 8 种主要污染物浓度的时空布局

由图 6 的 8 种大气污染物浓度布局图可对比出不同污染物的浓度高涵盖点区, 处理浓度分布的数目则可以知道污染的浓度范围, 其详细状况如表 3 所示。

表 3 8 种大气污染物的浓度范畴

污染物	区域数	污染浓度范围区域
CO	3	交通区 95 号; 交通区 22 号和生活区 1 号地点组合; 工业区 29 号
NO	4	交通区 95 号; 工业区 223 号; 交通区 22 号和生活区 1 号组合; 工业区 6、8 号和交通区的 9 号组合
SO_2	1	生活区 20 号和交通区 22 号组合
NO_2	1	工业区 8 号和交通区 22 号组合
O_3	3	工业区 8 号和交通区 9 号组合; 交通区 182 号; 交通区 257 号
PM_{10}	2	交通区 22 号; 山区 135 号
$PM_{2.5}$	2	生活区 16、20 号和农田区 143 号组合; 工业区 6、8 号组合
VOC	2	生活区 36 号; 交通区 61 号

5.3.2 大气污染负荷指数法模型

污染负荷指数法是污染的一个评价办法。该指数由地区所涵盖的各种环境污染分子组成, 并运用了求积的统计法。这个办法能对污染程度分级; 能直接看出各种污染物对环境污染的程度, 以及污染物在时间、空间上的变化趋势, 运用便利。[7]它也使用了研究区大

气背景值作为评价标准,因此可以判断大气的综合污染状况。

表 4 污染负荷指数与空气质量及对身体健康状况的影响

空气污染指数 PLI 值	空气质量级别	空气质量级别及表示的颜色		对健康状况的影响	建议采取的措施
<0.2	一级	优	绿色	空气质量令人满意	各类人群可正常活动
<0.5	二级	良	黄色	空气质量可以接受	极少的非常敏感的人们应该降低室外出行
<1	三级	轻度污染	橙色	易感人们病症有稍微严重,健康人们发生刺激现象	儿童、老人以及心脏病患者减少长时间户外活动
1	四级	中等污染	红色	易感人群症状更加严重,可能牵连健康人的心脏、呼吸系统	儿童、老年人以及心脏病患者尽量不要长时间的室外出行
2	五级	重度污染	紫色	心脏病和肺病患者病症更加严重,运动耐受力减弱,健康人们发生眩晕现象	儿童、老人以及心脏病患者应该呆在屋内,停止室外出行
3	六级	极强污染	褐红色	健康人们运动耐受力减弱,有明显强烈的现 象	儿童、老人以及心脏病患者需要降低体力消耗呆在屋内,普通人们尽量不要室外出行

首先根据某一点的测量污染物含量,进行最高污染系数(CF)的计算^[8]:

$$CF_i = \frac{C_i}{C_{0i}} \quad (2)$$

某一点的污染负荷指数(PLI)为:

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \cdots CF_n} \quad (3)$$

某一区域的污染负荷指数(PLI_{zone})为:

$$PLI_{zone} = \sqrt[m]{PLI_1 \times PLI_2 \times PLI_3 \cdots PLI_m} \quad (4)$$

表 5 污染负荷指数与污染程度的关联

PLI 值	<1	1~2	2~3	≥ 3
污染等级	0	1	2	3
污染程度	无污染	中等污染	强污染	极强污染

表 4 和 5 给出了污染指数与污染等级和空气质量的关系。通过 Matlab 可以得出每个

地方的最高污染系数和污染负荷指数,并运用这些点的数据得出如表 6 所示的五个地点的污染负荷指数(PLI_{zone})。

表 6 五个区域的污染负荷指数(PLI_{zone})

	生活区	工业区	山区	交通区	公园绿地区
PLI 值	1.8336	2.1573	1.0602	1.9209	1.5780
污染级数	1	2	1	1	1
污染程度	中等污染	强污染	中等污染	中等污染	中等污染

由以上表格能够知道该地区内污染水平为中等污染的地方有生活区、山区、交通区、公园绿地区。强污染的区域有工业区。

5.4 8 种大气污染物相关性分析及来源

研究大气污染的关键因素则要知道大气中不同污染物的影响元素。污染的影响元素表示生产大气污染物的仪器、地点、场合等源头。这些源头生产的污染有的直接进入,有的利用局部沉降和再旋流进入大气,导致区域的污染。大气污染源可以分成工业、交通、生活、农业废弃物等的污染源。

同一地区能够产生许多污染物,来源也不一样。相关分析和主成分分析等经常用在污染物源分析当中。为了归纳大气污染物的源头和类型,分析 5 个不一样的区域的 8 种大气污染物的源头并概括 5 个地区的源头得出该区域的大气污染的关键因素。

5.4.1 相关分析模型

相关分析就是研究两个或以上变量之间彼此联系的统计分析方法。经常使用它来定性的分析变量之间的相互联系,且相互联系用相关系数和相关系数的水准来表达[9]。相关分析法有很多,环境研究中最常见的是 Pearson 相关分析法。

表 7 生活区 Pearson 相关矩阵

	CO	NO	SO_2	NO_2	O_3	PM_{10}	$PM_{2.5}$

相关	CO						
	NO	0.381					
	SO_2	0.238	0.349				
	NO_2	0.531	0.499	0.376			
	O_3	0.293	0.397	0.150	0.198		
	PM_{10}	0.605	0.283	0.527	0.434	0.211	
	$PM_{2.5}$	0.450	0.802	0.416	0.502	0.340	0.300
	VOC	-0.017	0.346	0.412	0.238	0.242	0.334
相关系数矩阵 $R = (r_{ij})_{p \times p}$							

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n x_{ki}x_{kj}}{n-1}, (i, j = 1, 2, \dots, p) \quad (5)$$

式中: $r_{ii} = 1$, $r_{ij} = r_{ji}$, r_{ij} 是第 i 指标与第 j 指标的相关系数。

在大气污染的源头调查当中,当两各种类的大气污染物得含量绝对值最高,表示这两种污染物大概率来自相同的污染源。

1).生活区的矩阵见表 7。

从相关性分析结果可以发现,大气中 NO 与 $PM_{2.5}$ 显著正相关并且关联性较强;其次 CO 与 PM_{10} 、 NO_2 也到达了显著的正相关。以此类似可做出其他 4 个区域的 Pearson 相关矩阵(见附录 3)。

5.4.2 大气污染物的主成分分析

多变量研究中,当要描述的统计指标较多时,这些变量之间会有关联性,因此让数据得出的结果部分重叠,且指标的权重未能很好地解决。主成分分析是一种降维方法,压缩指标个数,使得综合指标之间既互不相关,又能保留原指标的大部分信息,权重较客观地多元统计分析方法[10]。由于本文在研究中涉及华北某市大气环境污染多个指标,数据较多,信息量较大且存在重叠,因此使用主成分分析会使分析过程更为清晰。

1.计算特征值和特征向量

计算相关系数矩阵,及对应的特征向量 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0$,及对应的特征向量 u_1, u_2, \dots, u_p ,其中 $u_j = (u_{1j}, u_{2j}, \dots, u_{nj})^T$,由特征向量组成 m 个新的指标变量

$$\begin{cases} y_1 = u_{11}x_1 + u_{21}x_2 + \dots + u_{n1}x_n \\ y_2 = u_{12}x_1 + u_{22}x_2 + \dots + u_{n2}x_n \\ \vdots \\ y_m = u_{1m}x_1 + u_{2m}x_2 + \dots + u_{nm}x_n \end{cases} \quad (6)$$

式中 y_1 是第一主成分, y_2 是第二主成分, \dots , y_m 是第 m 主成分。

2. 选择 $p(p \leq m)$ 个主成分, 计算综合评价值

A. 计算特征值 $\lambda_j (j=1, 2, \dots, m)$ 的信息贡献率和累积贡献率。称

$$b_j = \frac{\lambda_j}{\sum_{k=1}^m \lambda_k} \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (8)$$

为主成分 y_j 的信息贡献率;

$$a_p = \frac{\sum_{k=1}^p \lambda_k}{\sum_{k=1}^m \lambda_k} \quad (9)$$

为主成分 y_1, y_2, \dots, y_p 的累积贡献率, 当 a_p 接近于 1 ($a_p = 0.85, 0.90, 0.95$) 时, 则选择前 p 个指标变量 y_1, y_2, \dots, y_p 作为 p 个主成份, 代替原来 m 个指标变量, 从而可对 p 个主成分进行综合分析。

B. 计算综合得分:

$$z = \sum_{j=1}^p b_j y_j \quad (10)$$

其中: b_j 为第 j 个主成分的信息贡献率, 根据综合得分就可进行评价。由此可分别计算得 8 个不同区域的特征值和主成份因子; 生活区的结果如表 8 所示。

表 8 生活区解释的总方差

因子	特征值	方差的百分率(%)	累积贡献率(%)
1	3.616	45.199	45.199
2	1.133	14.165	59.365
3	1.075	13.432	72.797

对生活地区小样中的 8 中污染物做出分析, 提炼 3 个因数解释了总方差的 72.797%, 其中因数 1、因数 2 和因数 3 分别解释了总方差的 45.199%、14.165% 和 13.432%。生活区

的成份得分系数矩阵(因子载荷矩阵)见表 9。

表 9 生活区的成份得分系数矩阵(因子载荷矩阵)

		CO (mg/ m ³)	NO (μg/m ³)	S02 (μg/ m ³)	NO2 (μg/ m ³)	O ₃ (μg/ m ³)	PM10 可 吸入颗粒 物(μg/ m ³)	PM2.5 细颗粒 物 (μg/ m ³)	挥发性 有机物 VOC (mg/ m ³)
成 分	1	0.06	0.424	-0.092	0.112	0.364	-0.169	0.381	0.064
	2	-0.284	0.008	0.475	-0.026	-0.068	0.212	0.011	0.609
	3	0.454	-0.039	0.17	0.282	-0.087	0.424	0.014	-0.149

主成分分析是用相似的因子载荷的不同变量放在一个公因子中,变量与某个因子的联系系数绝对值(荷载)越高表示因子与变量的关联越近。根据因子载荷矩阵,主成份 1 为 NO 、 O_3 、 $PM_{2.5}$ 的合成,这证明这几种大气污染物或许是同一或类似源头。主成份 2 为 SO_2 、 VOC 。主成份 3 为 CO 、 NO_2 、 PM_{10} 。主成份 1 的方差累积贡献率达到 45.199%,这可以说明 NO 、 O_3 、 $PM_{2.5}$ 为主要污染成分。

Pearson 相关分析和主成份分析结果表明该生活区的 NO 、 O_3 、 $PM_{2.5}$ 存在很大的相关性,可以作为一个主成分变量,它们大概皆源于一个污染源。

同样,联系 Pearson 相关和主成份分析能够知道其他另外 4 个地区的污染源头。(见附录 3),表 10 指明了 5 个不一样的地区污染的源头。

表 10 五个不同区污染源

功能区	主要污染物	大气污染物可能来源
生活区	NO 、 O_3 、 $PM_{2.5}$	生活排污、餐饮垃圾,废气以及取暖烧煤排放。
工业区	SO_2 、 NO_2 、 $PM_{2.5}$ 、 VOC	冶炼、电镀、化学原料产生等粉尘和化合物排放
山区	CO 、 NO 、 NO_2 、 O_3 、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$	化肥、肥料杂质,农药等裂解气体
交通区	NO 、 NO_2 、 O_3 、 $PM_{2.5}$ 、 VOC	公交、汽车尾气和防爆燃料的排放
农田区	NO 、 NO_2 、 $PM_{2.5}$ 、 VOC	污泥,肥料杂质,秸秆燃烧,废弃物分解

对以上 5 个地区归纳总结可知道区与区之间的相关性很大,由主要污染源来计算可知工业区与交通区的相关性很大,则两者为同一污染区,污染源大部分是废气、粉尘;生活区和山区、农田区的相关性很大,则三者为同一污染区,污染源大部分是生活垃圾和污泥肥料杂质,废弃物分解。对 5 个区整体进行统计可以得出整个城市解释方差和成份得分系数矩阵。

表 11 城市解释的总方差

因子	特征值	方差的百分率(%)	累积贡献率(%)
1	8.726	72.76	72.76
2	2.247	18.74	91.51
3	0.649	5.41	96.92

城市的成份得分系数矩阵(因子载荷矩阵)

	CO	NO	SO2	NO2	O ₃	PM10	PM2.5	VOC
1	0.044	0.1664	0.5806	0.1259	0.0145	0.0342	0.0735	0.0005
2	0.2103	0.6413	-0.0034	0.1339	0.0723	-0.2051	0.3499	-0.0008
成份	3 -0.000 2	-0.3011	-0.1640	0.6976	0.2347	0.0198	0.2127	0.3006

综合综合分析表 11 给出的城市污染物分布的总体解释总方差和主成分因子载荷矩阵,得出该城区的主要大气污染物为: NO₂, NO, SO₂, PM_{2.5}。大气污染物的主要原因是: 交通废气、粉尘、生活垃圾和废弃物分解。

该城市大气污染物三个主成分变量 z_1 、 z_2 、 z_3 可确定为:

$$\begin{aligned}
 z_1 &= 0.044c_1 + 0.1664c_2 + 0.5806c_3 + 0.1269c_4 + 0.0145c_5 + 0.0342c_6 + 0.0735c_7 + 0.0005c_8 \\
 z_2 &= 0.2103c_1 + 0.6413c_2 - 0.0034c_3 + 0.1339c_4 + 0.0723c_5 - 0.2051c_6 + 0.3499c_7 - 0.0008c_8 \\
 z_3 &= -0.0002c_1 - 0.3011c_2 - 0.1640c_3 + 0.6976c_4 + 0.2347c_5 + 0.0198c_6 + 0.2127c_7 + 0.3006c_8
 \end{aligned}$$

(11)

写成矩阵形式为:

$$z = P c \quad (12)$$

其中:

$$c_j = \frac{C_j - \bar{C}_j}{\sigma_j} \quad (j = 1 \sim 8)$$

进一步整理可得主成分变量与原始采样浓度变量之间的线性关系为:

$$z_i = \sum_j P_{ij} \frac{C_j - \bar{C}_j}{\sigma_j} \quad (i=1 \sim 3, j=1 \sim 8) \quad (13)$$

即:

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0048 & 0.0011 & 0.0021 & 0.0013 & 0.0004 & 0.0015 & 0.0010 & 0.0010 \\ 0.0227 & 0.0041 & -0.0006 & 0.0014 & 0.0018 & -0.0092 & 0.0050 & -0.0016 \\ -0.0003 & -0.0019 & -0.0006 & 0.0071 & 0.0058 & 0.0009 & 0.0030 & 0.5894 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \\ C_7 \\ C_8 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0.9456 \\ 1.3877 \\ 0.2277 \end{bmatrix} \quad (14)$$

基于主成分值,给定每一种污染物排放质量 $Y_j (j=1 \sim 8)$,可以由式(15)~(17),获得相应的排放体积总量:

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \\ C_7 \\ C_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 117.0256 & 19.5 & -0.1428 \\ 46.9366 & 151.6412 & -34.2962 \\ 261.4808 & -91.6435 & -44.0215 \\ 23.8037 & 23.1545 & 98.9863 \\ -0.42 & 0.18 & 1.85 \\ 290.2612 & -60.7305 & -0.6444 \\ -0.453 & 0.075 & 1.48 \\ -0.4316 & 0.0919 & 1.6976 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 137.6837 \\ 266.858 \\ 235.79 \\ 77.9 \\ 0.11 \\ 190.042 \\ 0.09 \\ 0.106 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \\ X_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/C_1 \\ 1/C_2 \\ 1/C_3 \\ 1/C_4 \\ 1/C_5 \\ 1/C_6 \\ 1/C_7 \\ 1/C_8 \end{bmatrix} \quad (16)$$

总的排放体积 X 为每一种污染物排放体积总和:

$$X = \sum_j X_j \quad (j=1 \sim 8) \quad (17)$$

代入式(1),容易获得城市总体 GDP 值与主成分的回归关系:

$$Gp = F(z_i) \quad (i=1 \sim 3) \quad (18)$$

5.5 大气污染物扩散传播规律

基于大气污染物的扩散特点,可以知道污染物利用对流扩散的方式,对该市区的 319 个样本进行抽查,可以捕获瞬态时刻的污染物的浓度分布从而寻得污染源位置。

5.5.1 二维非稳态对流扩散模型的建立

每个污染物都是在特定的大气环境下任意扩散的,只是扩散运输的能力不一样。根据大气污染物的扩散特点,可以知道大气污染物主要是对流和扩散。抽查市区大气环境,按照每平方公里 1 个采样点取得样本,得到某个时刻每个采样点大气污染物浓度 $C(x, y, \tau_0)$,建立二维传播方程^[10]:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + u_x \frac{\partial C}{\partial x} + u_y \frac{\partial C}{\partial y} = d_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + d_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (19)$$

在二维传播模型中,污染源的质量浓度为 $M(\text{Kg/m}^3)$,求解偏微分方程,可以得出在不同时刻、不同地点大气污染物的浓度 $C(x, y, \tau)$ 的分布:

$$C(x, y, \tau) = \frac{M \Delta S}{4\pi(\tau - \tau_0) \sqrt{d_x d_y}} \exp \left[-\frac{(x - x_0 - u_x(\tau - \tau_0))^2}{4d_x(\tau - \tau_0)} - \frac{(y - y_0 - u_y(\tau - \tau_0))^2}{4d_y(\tau - \tau_0)} \right] \quad (20)$$

其中: ΔS 为污染源占地面积大小; x_0 和 y_0 为污染源在 x 和 y 方向的坐标; d_x 和 d_y 分别表示沿 x 和 y 方向的扩散系数; u_x 和 u_y 为沿 x 和 y 方向的对流速度。

二维非稳态对流扩散模型基于采样时刻污染物浓度分布可以预测未来不同时刻污染物的整体运移扩散情况,为了反应大气环境的演化机制,找到污染物移动的空间关联,从同一时间内思考污染物浓度的定量刻画奠定了坚实的基础。

下面,基于式(20)给出的任意时刻大气污染物浓度演化分布,计算得到不同时间每个采样点的大气污染物浓度。

5.5.2 污染源的确定

1. 二维传播系数的确定

首先根据各个地点的 319 个采样点的污染浓度布局以及污染物类型的时空布局,可以得出局部最高点,即极大值点。但是由于一些极大值点的污染小所以不能成为污染源。假设当污染指数大于 2,即大于中度污染时,可以将局部最高点暂定为预备污染源位置,如

表 12 所示。

表 12 污染指数 PLI>2 对照的各污染物浓度

污染物	CO (mg/ m3)	NO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	S02 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10 可吸入 颗粒物 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2.5 细颗粒 物 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	挥发性 有机物 VOC (mg/ m3)
浓度	>43.48	>420.1	>648	>34.56	>4.05	>114.75	>210.1	>0.49

选择了预备污染源后,拟定半径 2 公里以内的所有采样点,将采样点大气污染物的浓度用 Matlab 整合数据,从而获得 2 公里区域中的传播系数,由假设可知,在小范围内,传播系数为定值,从而可得此地区内的二维传播模型。

2. 二维传播系数的 Matlab 求解和结果分析

根据 Matlab 获得 8 种大气污染物的传播系数:

表13 传播系数

对流扩散系数	d_x	d_y	v_x	v_y
CO	0.217	0.551	0.849	0.178
NO	0.864	0.349	0.190	0.806
SO2	0.530	0.736	0.029	0.865
NO2	0.771	0.349	0.299	19.810
O ₃	5.504	2.564	4.936	3.150
PM10	0.459	0.093	0.691	0.364
PM2.5	7.436	1.266	6.136	-3.607
VOC	1.019	1.763	-4.300	2.480

3. 污染源的确定

由于污染源有每个地区的直接影响值,污染源数量多时很难得到最优解的模型,获得污染源和对流扩散效应就更艰难。因此利用模型分析流扩散和点源模型对大气污染物流动,根据传播系数,可以得到大气污染的浓度的公式,找到在特定的范畴内浓度最高的点,因此对大气污染物的浓度 $C(x,y,\tau)$ 求取偏导数,确定污染源位置:

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial C}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (21)$$

综上可求得,大气污染二维非稳态传播浓度分布为:

$$\left\{ \begin{array}{l} C(x,y,\tau) = \frac{M\Delta S}{4\pi(\tau-\tau_0)\sqrt{d_x d_y}} \exp \left[-\frac{(x-x_0-u_x(\tau-\tau_0))^2}{4d_x(\tau-\tau_0)} - \frac{(y-y_0-u_y(\tau-\tau_0))^2}{4d_y(\tau-\tau_0)} \right] \\ \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial C}{\partial y} = 0 \\ PLI > 2 \end{array} \right. \quad (22)$$

最终用Matlab获得各种大气污染物的污染源所在地点。

表14 各污染源的位置

污染物	x	y	区域	浓度值	个数	污染物	x	y	区域	浓度值	个数	
CO	4742	7293	2	66.95	3	O ₃	15248	9106	4	345	3	
	12696	3024	4	72.61			13694	2357	4	372.5		
	18134	1004 6	4	92.23			2708	2295	4	400		
NO	1647	2728	2	765.03	4	PM10	22193	1218 5	3	166.5	2	
	2708	2295	4	786.73			3299	6018	4	320.6		
	3299	6018	4	849.45		PM2.5	4777	4897	1	661.4	2	
	21439	1138 3	4	1133.8			2383	3692	2	534.3		
SO2	2383	3692	2	1142.3 2	4	VOC	2383	3692	2	2.127	6	
	10685	5528	4	1224.0 8			12696	3024	4	2.454		
	4592	4603	1	2977.8 4			3299	6018	4	2.728		
	3299	6018	4	3683.3 6			9328	4311	1	4.34		
NO2	3299	6018	4	818.91	2		13797	9621	4	5.641		
	2383	3692	2	1517.0 9			2383	3692	2	2.127		

根据表14可知,CO的污染源数量为3个,且离工业区很近,由此可以推断,CO的污染大部分来自工厂; NO的污染源为4个,源头较多且分散,经过比对我们可以看出,它们离交通区很近,因此我们可以推断 NO的来源大部分是车尾气的排放;SO2的数量为4个,但是SO2布局疏散,由于SO2迁移有一定的规律性;NO2的数目为2个,由于NO2的附着能力高,移动和散布不容易;O₃的数量为3个,离工业区很近,O₃污染大部分原因是工矿企业; PM10的数目为2个,且两个地区离生活区非常近,由于生活区对燃煤使用量大,煤炭是大气中PM10的主要来源; PM2.5的数量为2个,我们可以知道,离工业区近的地点 PM2.5的浓度更高,这些地点存在一定的细颗粒物排放化工公司;挥发性有机物VOC的数量为6个,且这

些点比较疏散,原因是VOC在大气中易与移动和扩散。

最后,由污染源所处位置区域划分类型可以看出,该城市大气污染主要来源于2区(工业区)和4区(交通区),即,交通业和工业是污染大户。

5.6 大气污染物最优化治理方案

针对该市污染源分布特点,我们给出优化治理方案,整个方案基于以下两点考虑:在环境方面,污染源排放量与环境污染指数成正比,排放量越低显然环境质量越好;另一方面,为追求一定的 GDP规模,基于环境与经济的 EKC曲线关系,该市污染物排放不能无限制降低下去,因此对于整个城市的整治而言,存在一个最优化的方案。从经济学角度分析,大气污染物治理方案问题等价于一个多变量目标优化问题[10],求解变量为:污染物排放量标准,而目标函数分为两个指标:指标1: 污染指数(环境参数) PLI ;指标2:单位GDP污染物排放量 $\frac{P}{G}$ 。

$$\text{Min: } f(X_j) = PLI(X_j) + \frac{P(X_j)}{G(X_j)}$$

$$St. \quad X_{j,\min} \leq X_j < X_{j,\max} \quad (j=1 \sim 8) \quad (23)$$

由于本文涉及的污染物种类繁多,为了寻找最优化的治理,我们首先逐一分析单个污染物排放量控制对环境污染指数和 GDP的影响,由于每一种污染物类型对应多个污染源,有必要研究各个污染源减排量的比例分配,这里对每一种的治理降低规模假定为单一污染源排放量。找到最优的排放方案,进而可以基于经济学敏感性分析对这8种污染物对应的最优排放方案进行排序,找出城市污染指数相对较高同时对 GDP冲击相对较小的污染物类型作为优先考虑治理对象。

5.6.1 华北某市大气污染治理的投入产出矩阵分析

投入产出分析是再生产环节之中数目联系的一种方法[13],它利用直接消耗系数矩阵/完全消耗系数矩阵反应整个经济系统各部门的关联。

针对本文涉及的各个大气污染物采样点所属区域分类,分别为生活区、工业区、山区、交通区、农田区,与此对应相关产业可进行归类为 5 个行业,依次为:餐饮业、重工业、旅游业、交通业和农业。这一节,我们首先基于环境污染两个重要概念,即直接产污系数矩阵 A

和完全产污系数矩阵 B ,根据投入产出分析方法建立行业影响关系矩阵,反应这 5 个系统各个行业之间的相互依存关系,然后针对该市污染治理方案建立优化模型,为政策模拟和治理规划以及经济控制等提供依据^[14]。

环境保护投入产出矩阵的特征是: 在行中增加若干个数目的污染物类型,在列中增加相应的行业类型,按照投入产出模型,可以建立各部门的各种污染物的形成方程:

$$\sum_j R_{ij} + W_i = Q_i \quad (24)$$

其中, R_{ij} :第 j 部门所排放的第 i 种污染物总量; W_i :最终需求领域所排放的第 i 种污染物总量; Q_i :第 i 种污染物总的排放量。

引入直接污染系数 a_{ij} ,它为第 j 部门单位产值所排放的第 i 种污染物总量:

$$a_{ij} = R_{ij} / X_i \quad (25)$$

其中, X_i 为第 i 种污染物排放总量(由各个行业累加得到)。

将 a_{ij} 带入公式(24)整合 即可得到:

$$\sum_j a_{ij} X_i + W_i = Q_i \quad (26)$$

该方程组可写成矩阵形式为:

$$aX + W = Q \quad (27)$$

其中, a 表达污染物产生的系数矩阵, X, W, Q 分别表达总产出的列向量,最后需求领域污染物列向量和总的污染物排放列向量。

完全产污系数 b_{ij} ,它是第 j 部门每生产一个单位最终产品时,所排放的第 i 种污染物总量;因此,完全产污系数=直接产污系数+间接产污系数, $b_{ij} = a_{ij} + \sum_{k=1}^n b_{ik} a_{kj}$,用矩阵形式表示为:

$$B = A + BA \quad (28)$$

容易解得完全产污系数矩阵:

$$B = A(I - A)^{-1} \quad (29)$$

其中, A :直接产污系数; $(I - A)^{-1}$ 起放大器作用,经济学上称之为列昂涅夫逆矩阵。列昂涅夫逆矩阵放大器的作用,列昂涅夫逆矩阵放大器的扩大了对产物的间接消耗,扩大了产品的间接关联。

为了获得直接产污系数矩阵,如上所述,由于采样数据中每一个功能区域代表一个相应的产业类型,这里可以对每一种污染物分区统计,按照面积加权方式累加求和作为相应产业的排放量,各个产业排放量之比即为矩阵的每一列元素:按照 8 种污染物(CO、NO、SO₂、NO₂、O₃、PM₁₀、PM_{2.5}、挥发性有机物 VOC)的次序可确定 A 如下:

$$A = \begin{pmatrix} 0.172 & 0.174 & 0.16 & 0.652 & 0.13 \\ 0.149 & 0.177 & 0.113 & 0.772 & 0.11 \\ 0.201 & 0.136 & 0.164 & 0.703 & 0.0964 \\ 0.14 & 0.316 & 0.0709 & 0.733 & 0.0649 \\ 0.0483 & 0.292 & 0.0308 & 0.966 & 0.0454 \\ 0.165 & 0.156 & 0.202 & 0.661 & 0.105 \\ 0.174 & 0.205 & 0.133 & 0.667 & 0.116 \\ 0.183 & 0.188 & 0.082 & 0.782 & 0.0906 \end{pmatrix}$$

分析 A 矩阵每一行元素,可以看出,对于所有污染物而言,4 区即交通业均是最大的贡献来源,对于这 8 种污染物贡献占比分别为:65.2%, 77.2%, 70.3%, 73.3%, 96.6%, 66.1%, 66.7%, 78.2%。

进而由式(29),完全产物系数矩阵确定为:

$$B = \begin{pmatrix} 0.3333 & 0.3318 & 0.3234 & 0.6921 & 0.2944 \\ 0.3158 & 0.3342 & 0.2872 & 0.7826 & 0.2793 \\ 0.3557 & 0.3030 & 0.3261 & 0.7309 & 0.2697 \\ 0.3084 & 0.4392 & 0.2545 & 0.7534 & 0.2469 \\ 0.2375 & 0.4212 & 0.2237 & 0.9295 & 0.2328 \\ 0.3283 & 0.3184 & 0.3551 & 0.6994 & 0.2758 \\ 0.3351 & 0.3555 & 0.3026 & 0.7036 & 0.2841 \\ 0.3422 & 0.3426 & 0.2631 & 0.7907 & 0.2656 \end{pmatrix}$$

5.6.2 基于污染指数时空演变模拟的单个大气污染物优化减排方案分析

为了寻找最优化的治理,从优化目标函数出发,本小节逐一分析单个污染物排放量控制对环境污染指数与 GDP 的影响,各个污染物类型对应多个源头,有必要研究各个污染源减排量的比例分配,这里对每一种污染物的治理降低规模假设为单个污染源排放量(以 SO₂ 为例,由表 14 给出的各个污染源位置,可以看出 SO₂ 的污染源个数为 4 个, SO₂ 治

理排放总的降低水平为 1 个污染源的排放量,于是,经过治理后的排放量缩小了 3 倍)。利用各个污染源排放量方案进行对比,找到最优的排放方案。

其中对于区域污染指数的描述,大气污染物时空分布的动态模拟是核心问题,由于任意两个地区迁移速度涉及到大量随机的现象,用普通的方法不容易得到答案,这里运用仿真模拟出未来 1-15 天的浓度布局。

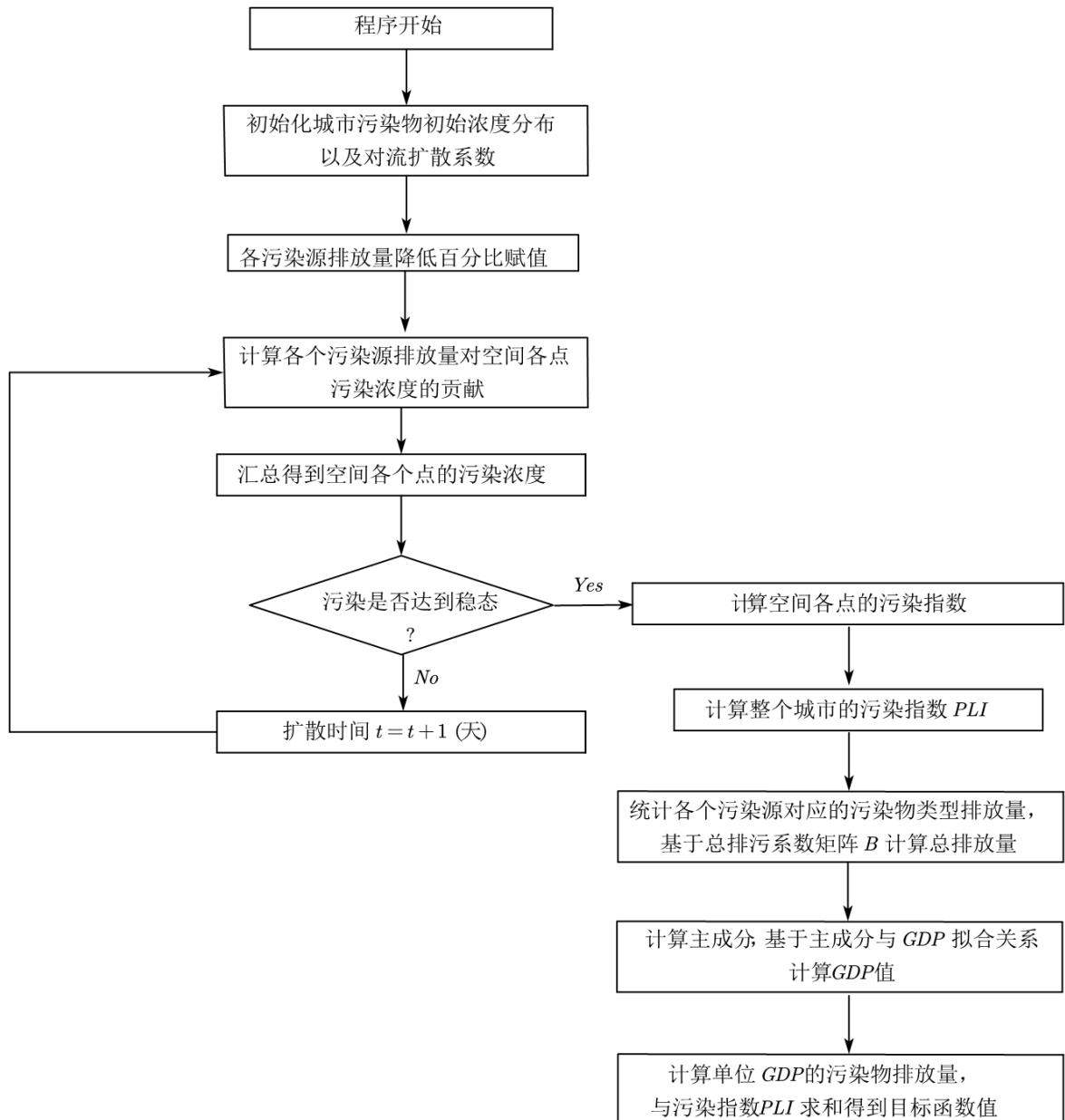


图 7 基于污染指数时空演变模拟的单个污染寻优解排方案

模拟算法如下:

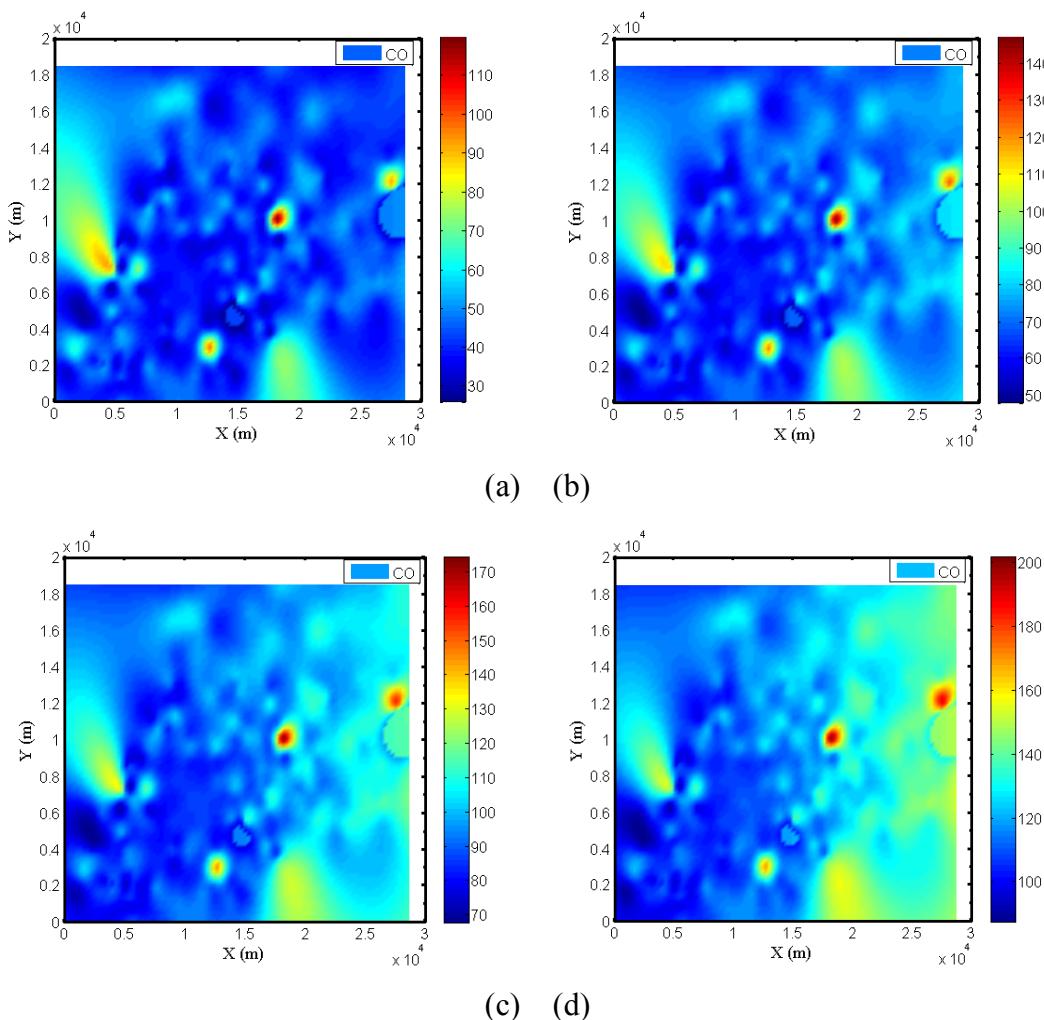
- (1).(1). 初始化时刻任意位置浓度分布场;
- (2). 确定各点污染物迁移速度和扩散系数,

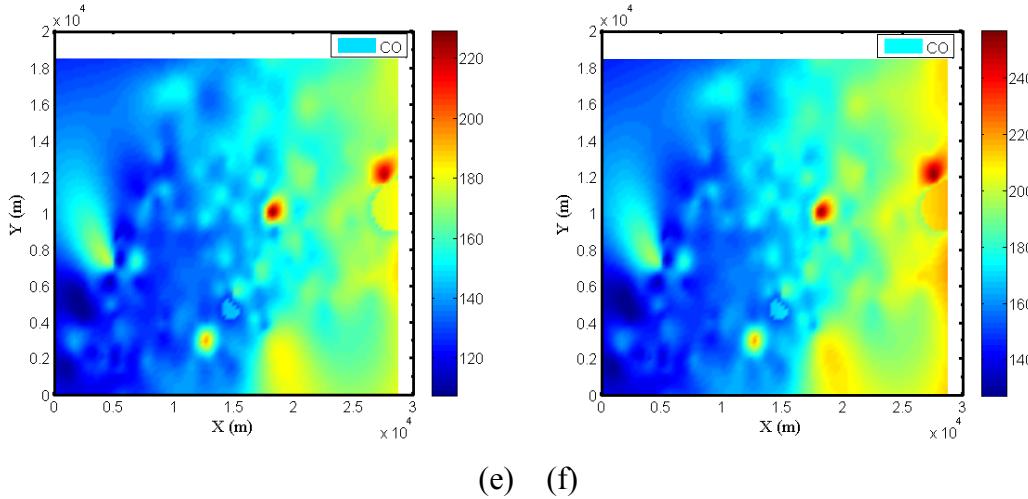
调整各虚拟污染汇的强度值(表征各污染物整体削减量 m_i);(3).按照叠加原理基于式(30)计算各个污染源不同削减比例方案对应的城市各点的浓度值 $C(x,y,\tau)$;(4).模拟时间更新,判断污染物传播是否达到稳态;(5).基于稳态浓度分布计算城市整体污染指数 PLI ;(6).计算各个不同削减比例方案对应的城市总体 GDP 值; (7).代入目标函数(23),基于目标函数最小值,即环境方面污染指数最小,同时兼顾经济增长,产生 GDP 污染排放最小,对比各个不同方案找到最优减排方案。

$$C(x,y,\tau) = \sum_i \frac{(M_i - m_i) \Delta S_i}{4\pi(\tau - \tau_0) \sqrt{d_x d_y}} \exp \left[-\frac{(x - x_i - u_x(\tau - \tau_0))^2}{4d_x(\tau - \tau_0)} - \frac{(y - y_i - u_y(\tau - \tau_0))^2}{4d_y(\tau - \tau_0)} \right] \quad (30)$$

整个模拟和优化流程如图 7 所示,

通过 Matlab 模拟仿真分析,可以发现经过 15 天所有的污染物扩散均可达到稳态,未来 15 天 8 种大气污染物浓度分布如图 8~15 所示,基于优化目标函数的各个污染物最优化减排方案如表 15~22 所示。这里针对每一种污染物仅给出最优方案,其他方法见附录 4。



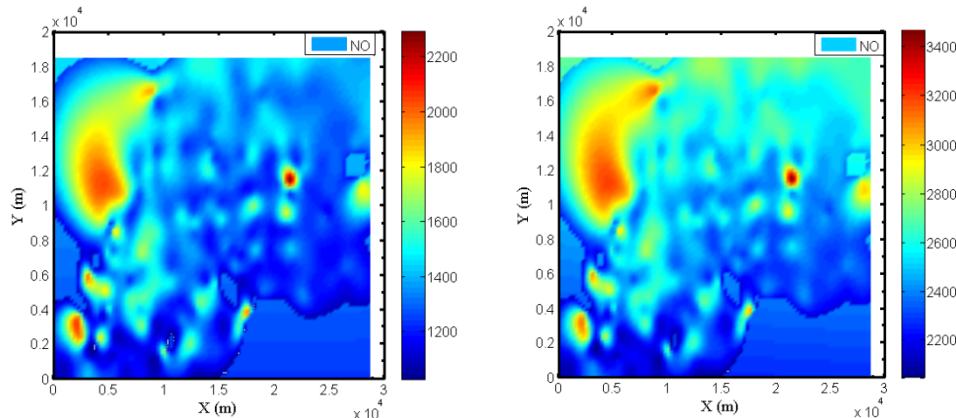


(e) (f)

图 8 未来 15 天 CO 浓度的空间分布:(a):第 2 天;(b):第 5 天;(c):第 8 天;(d):第 10 天;(e):第 12 天;(f):第 15 天;

表15 CO各污染源优化减排方案

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m ³)	降低比例
CO	4742	7293	2	0.0177	36.18%
	12696	3024	4	0.0754	27.48%
	18134	10046	4	0.0662	36.33%
污染物排放总量(亿 m ³)		8.2108		污染指数 PLI	1.0599
GDP(亿元)		210.067		单位 GDP 排放量(亿 m ³ /亿元)	0.039086
目标函数值				1.099	



(a) (b)

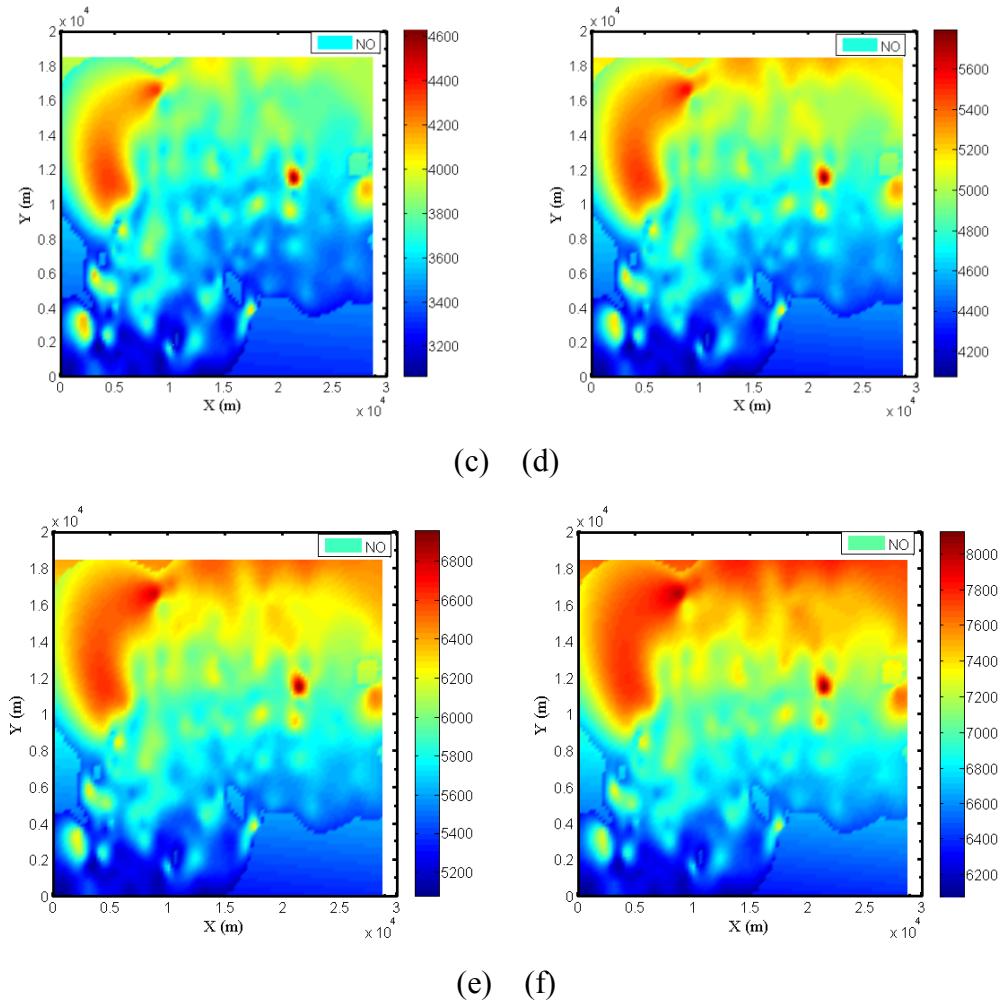


图9 未来15天NO浓度的空间分布:(a):第2天;(b):第5天;(c):第8天;(d):第10天;(e):第12天;(f):第15天;

表16 NO各污染源优化减排方案

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m ³)	降低比例
NO	1647	2728	2	0.1371	32.83%
	2708	2295	4	0.6041	32.01%
	3299	6018	4	0.5887	33.75%
	21439	11383	4	0.8762	1.41%
污染物排放总量(亿 m ³)	7.7705		污染指数 PLI	2.6658	
GDP(亿元)	177.2234		单位 GDP 排放量(亿 m ³ /亿元)	0.043846	
目标函数值				2.7097	

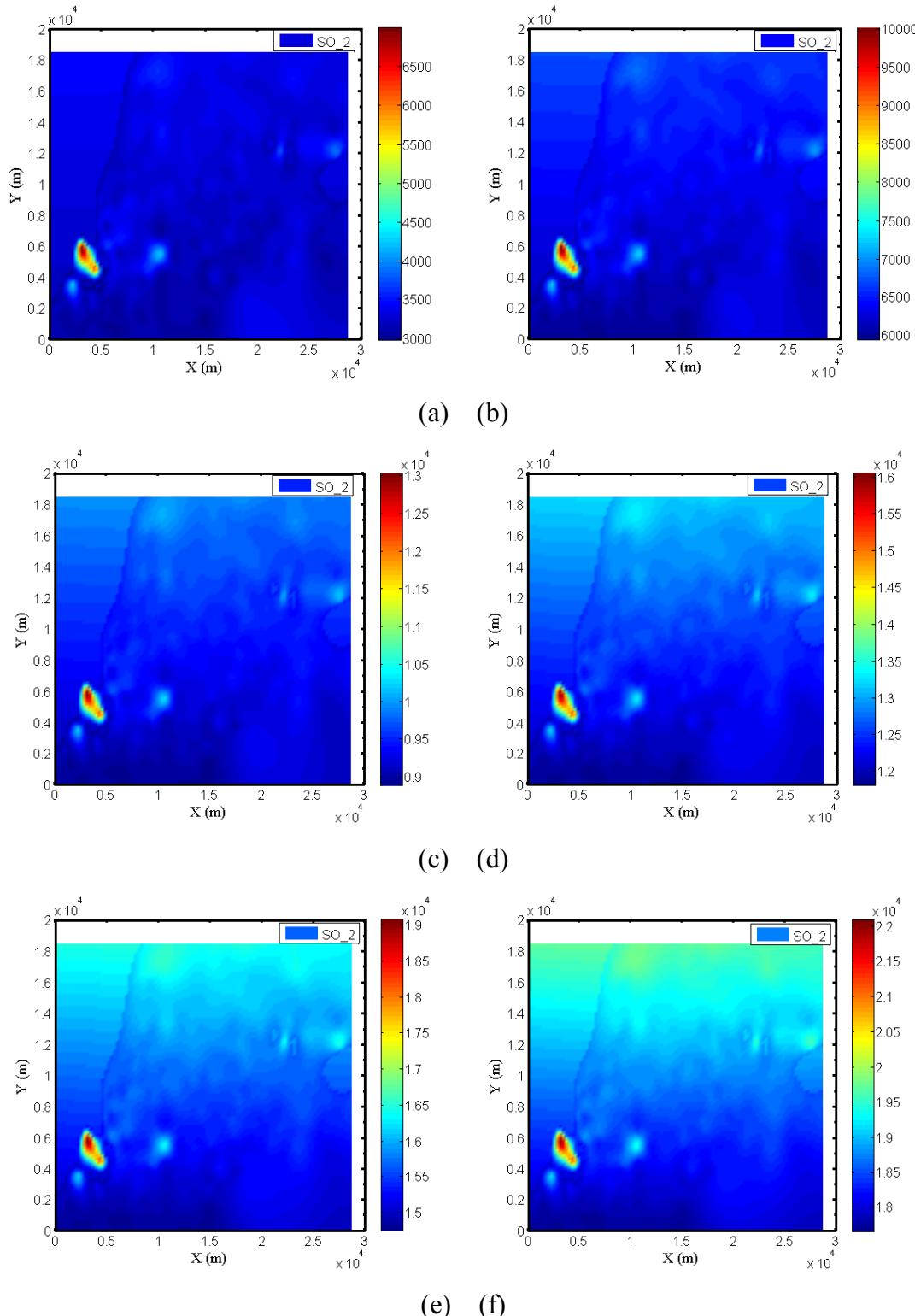
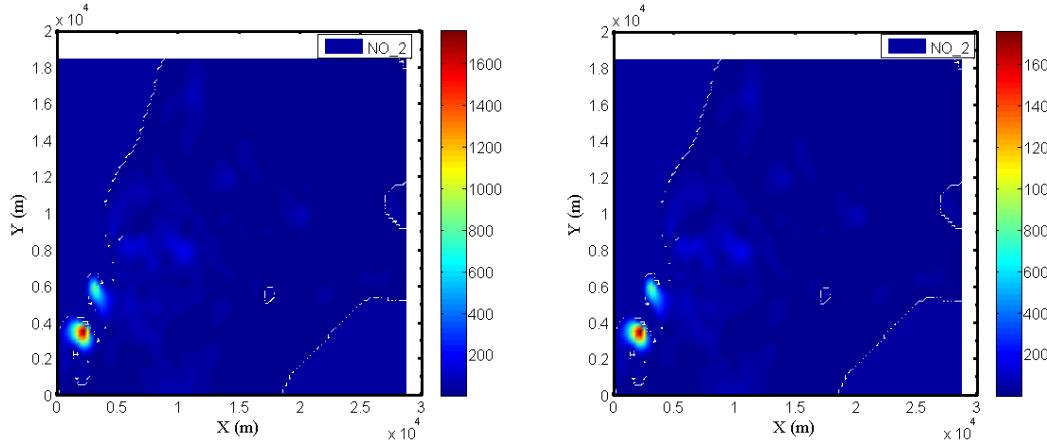


图 10 未来 15 天 SO₂浓度的空间分布:(a):第 2 天;(b):第 5 天;(c):第 8 天;(d):第 10 天;(e):第 12 天;(f):第 15 天;

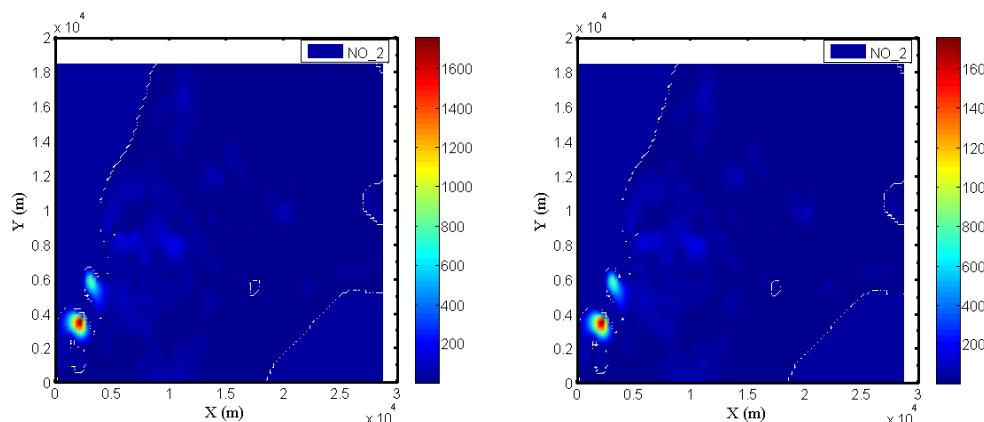
表 17 SO₂ 各污染源优化减排方案

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m ³)	降低比例
	2383	3692	2	0.1647	27.32%

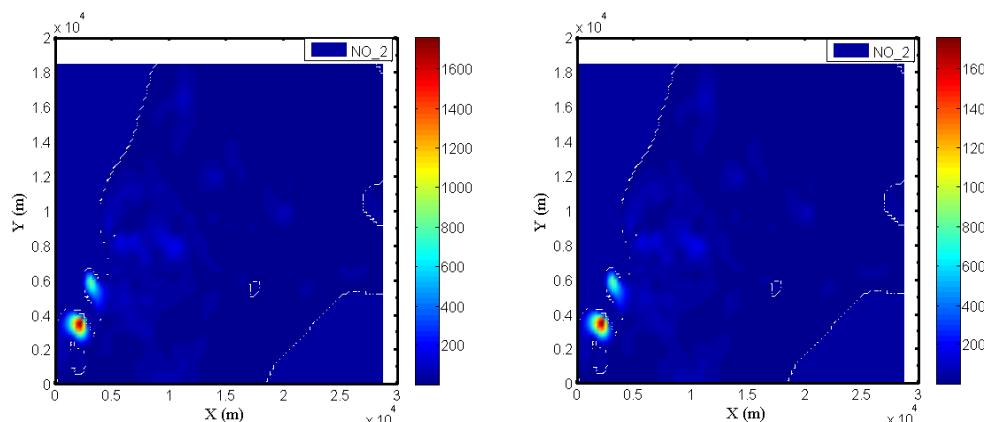
SO2	10685	5528	4	0.9928	15.19%
	4592	4603	1	0.2014	39.71%
	3299	6018	4	0.9626	17.77%
污染物排放总量(亿 m ³)		7.912		污染指数 PLI	1.6107
GDP(亿元)		188.0818		单位 GDP 排放量(亿 m ³ /亿元)	0.04207
目标函数值			1.6528		



(a) (b)



(c) (d)



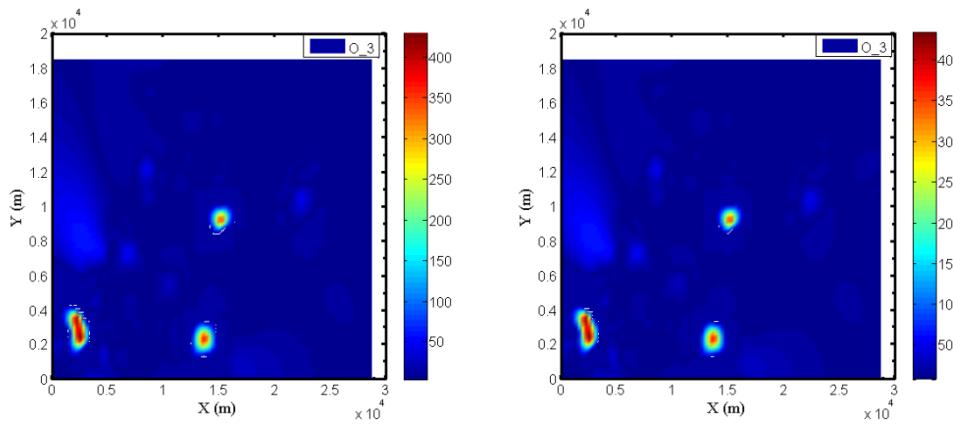
(e) (f)

图 11 未来 15 天 NO₂浓度的空间分布:(a):第 2 天;(b):第 5 天;(c):第 8 天;(d):第 10 天;(e):

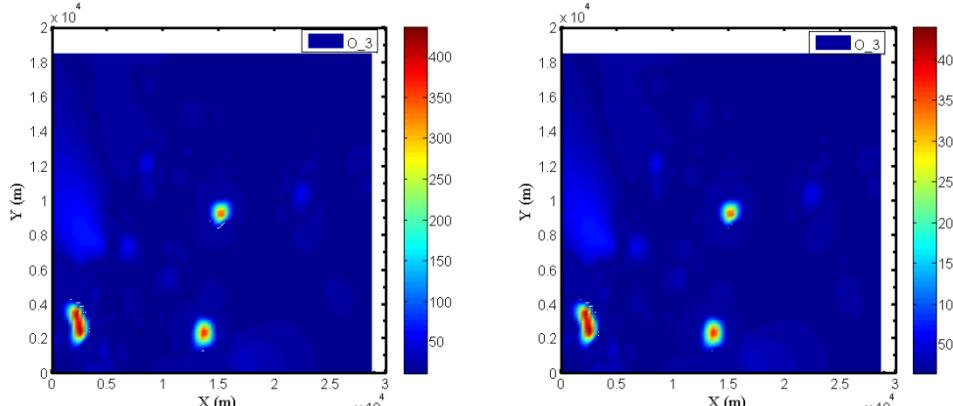
第 12 天;(f):第 15 天;

表 18 NO₂ 各污染源优化减排方案

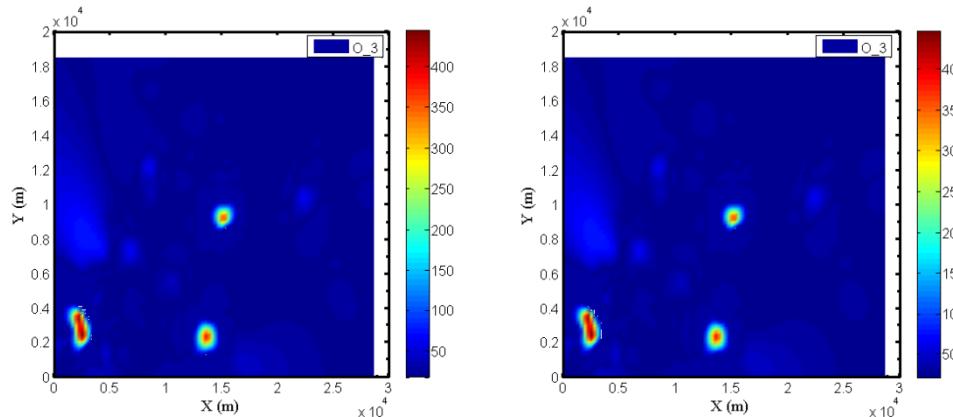
污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m ³)	降低比例
NO ₂	3299	6018	4	0.2563	17.92%
	2383	3692	2	0.0241	82.08%
污染物排放总量(亿 m ³)	8.1693		污染指数 PLI	0.01298	
GDP(亿元)	207.11		单位 GDP 排放量(亿 m ³ /亿元)	0.03944	
目标函数值				0.05242	



(a) (b)



(c) (d)

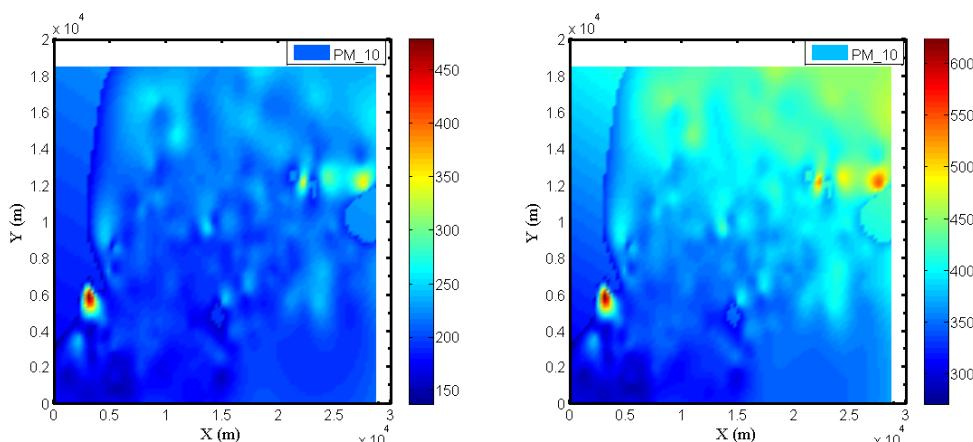


(e) (f)

图 12 未来 15 天 O₃ 浓度的空间分布:(a):第 2 天;(b):第 5 天;(c):第 8 天;(d):第 10 天;(e):第 12 天;(f):第 15 天;

表 19 O₃ 各污染源优化减排方案

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m ³)	降低比例
O ₃	15248	9106	4	0.0253	25.54%
	13694	2357	4	0.0242	28.79%
	2708	2295	4	0.0185	45.66%
污染物排放总量(亿 m ³)		8.2284	污染指数 PLI		0.021486
GDP(亿元)		211.312	单位 GDP 排放量(亿 m ³ /亿元)		0.038936
目标函数值			0.060426		



(a) (b)

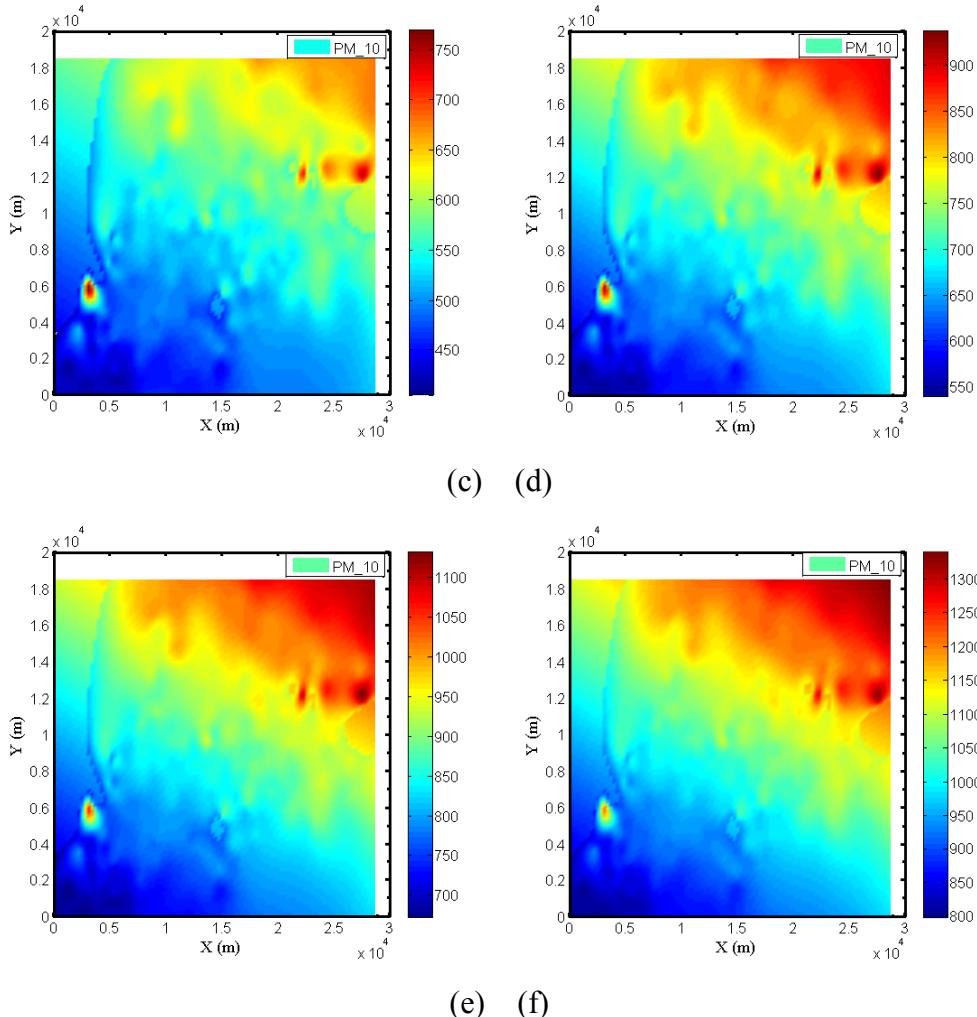


图 13 未来 15 天 PM₁₀ 浓度的空间分布:(a):第 2 天;(b):第 5 天;(c):第 8 天;(d):第 10 天;(e):第 12 天;(f):第 15 天;

表 20 PM₁₀ 各污染源优化减排方案

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m ³)	降低比例
PM10	22193	12185	3	0.1127	8.398%
	3299	6018	4	0.0339	91.61%
污染物排放总量(亿 m ³)		7.9977		污染指数 PLI	1.4153
GDP(亿元)		194.54		单位 GDP 排放量(亿 m ³ /亿元)	0.0411
目标函数值				1.4564	

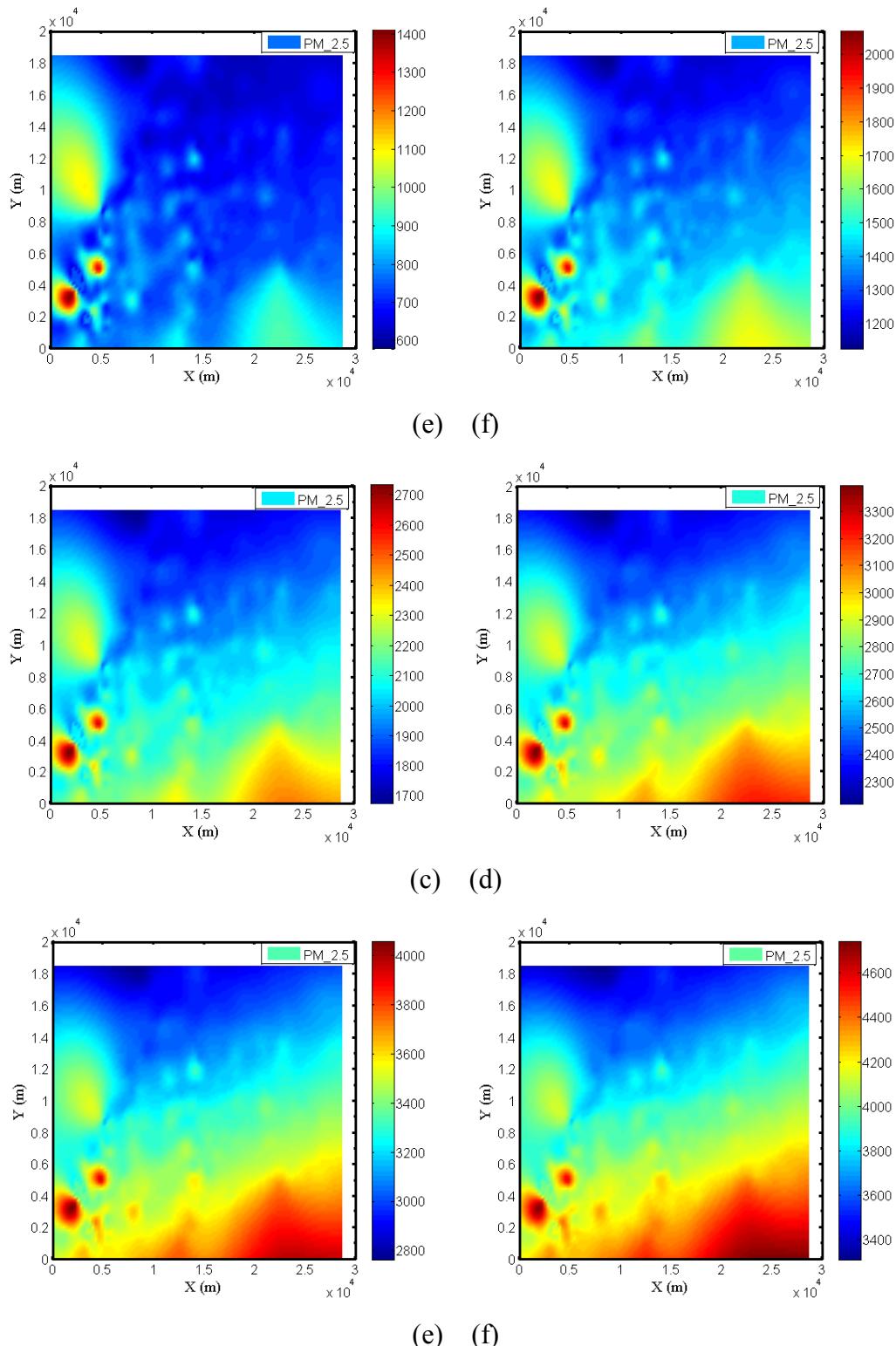


图 14 未来 15 天 PM_{2.5}浓度的空间分布:(a):第 2 天;(b):第 5 天;(c):第 8 天;(d):第 10 天;(e):第 12 天;(f):第 15 天;

表 21 PM_{2.5} 各污染源优化减排方案

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m ³)	降低比例
PM _{2.5}	4777	4897	1	0.3015	43.91%

	2383	3692	2	0.2786	56.09%
污染物排放总量(亿 m ³)		8.0544		污染指数 PLI	1.1401
GDP(亿元)		198.75		单位 GDP 排放量(亿 m ³ /亿元)	0.040525
目标函数数值					1.1806

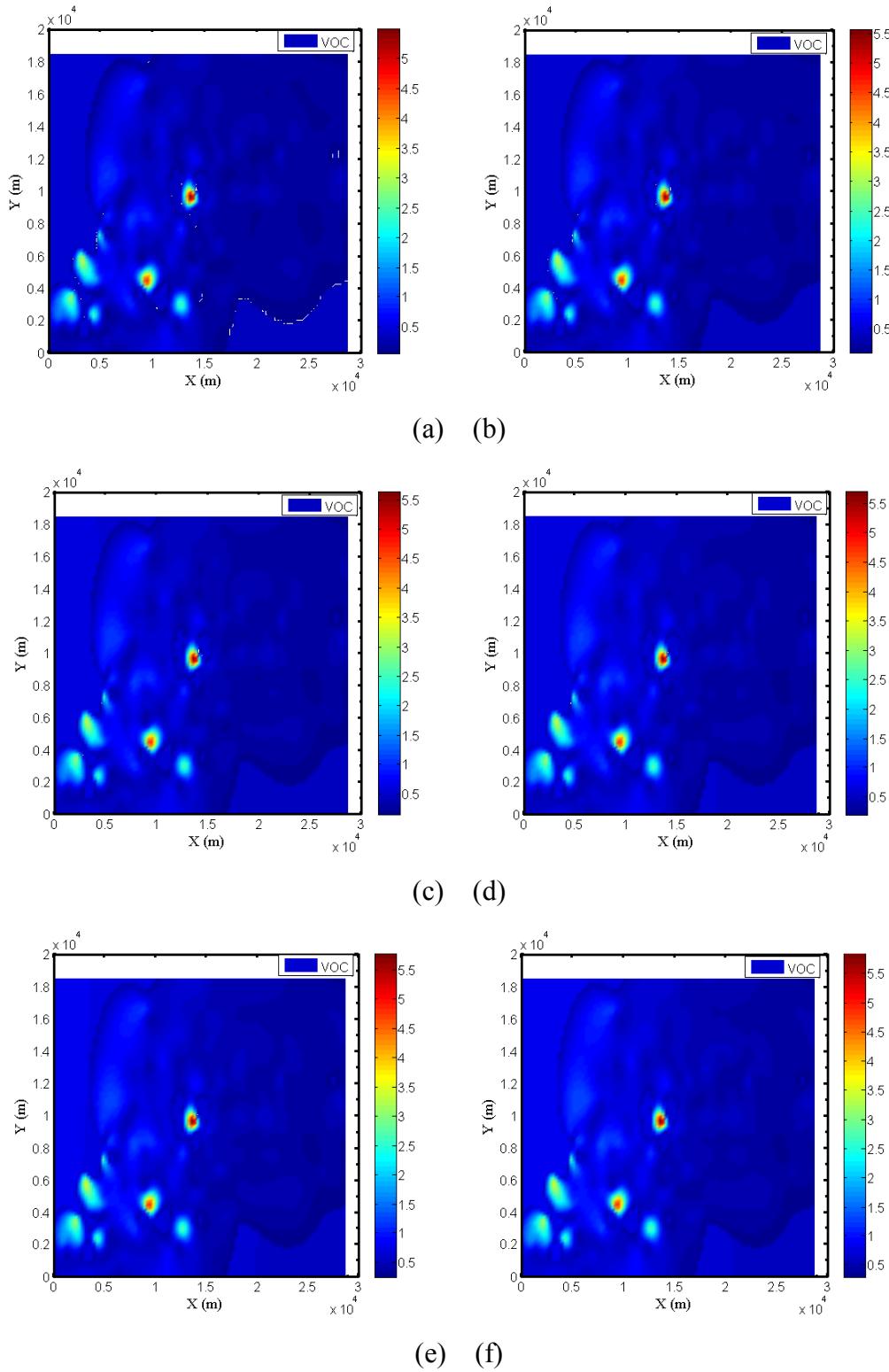


图 15 未来 15 天 VOC 浓度的空间分布:(a):第 2 天;(b):第 5 天;(c):第 8 天;(d):第 10 天;(e):

第 12 天;(f):第 15 天;

表 22 VOC 各污染源优化减排方案

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m ³)	降低比例
VOC	2383	3692	2	0.2408e-3	9.34 %
	12696	3024	4	0.9034e-3	18.13%
	3299	6018	4	0.9677e-3	12.31%
	9328	4311	1	0.2313e-3	10.50%
	13797	9621	4	0.9182e-3	16.79%
	2383	3692	2	0.1781e-3	32.95%
污染物排放总量(亿 m ³)	8.2595		污染指数 PLI	0.04902	
GDP(亿元)	211.49		单位 GDP 排放量(亿 m ³ /亿元)	0.038687	
目标函数值			0.087705		

从 8 种大气污染物选择 2 种污染物 $PM_{2.5}$ 和 NO_2 , 对它们达到稳态传播期间的浓度分布分析, 对图 14 进行分析可以得到, 之前 15 天红色地区的范畴比之前 8 天的范畴大, 可以知道前 15 天 $PM_{2.5}$ 污染的规模逐渐扩大直到稳态, 由于扩散性, 时间越长污染越严重, 比较以上时空演变分布, 可以较为准确的得出的污染指数, 由于工业排放已经形成了强污染。而图 11 指示的 NO_2 的浓度基本变化不大, 是由于 NO_2 的附着能力强, 不方便移动和扩散。这 2 种污染物分别代表了强扩散和不易扩散的 2 种类型, 对于不同的扩散类型, 在制定污染治理方案时需要区别对待, 对于强扩散污染物由于对城市污染指数影响显著, 故而削减一定的指标带来的环境效益是非常可观的。

5.6.3 污染整体方法分析

为了进一步多个污染物组合减排优化方案, 我们基于 5.6.2 节分析给出的单个污染物减排方案, 引入弹性函数分析 $\Delta Q / Q$ 与自变量的相对变化量 $\Delta p / p$ 之比, 对 8 种污染物最优化减排方案进行敏感性分析:

$$E(p, Q) = \frac{\Delta Q / Q}{\Delta p / p} \quad (31)$$

$E(p, Q)$ 反映了自变量的变化幅度的大小, 也就是函数 $Q(p)$ 对自变量变化 Δp 反应的强烈程度或灵敏度。

这里以 8 种污染物减排量为研究自变量, 函数因变量取为 GDP 变化, 基于式(31)对其进行敏感性分析, 如表 23 所示。

表 23 8 种污染物方案的灵敏度分析

污染物	污染指数 PLI	单位 GDP 排放量(亿立方米/亿元)	排放降低总量(亿立方米)	排放量相对降低百分比	GDP 变化量(亿元)	GDP 相对变化百分比	灵敏度
CO	1.0599	0.0391	0.0547	23.22%	1.5361	0.72%	0.03126
NO	2.6658	0.0438	0.4950	17.24%	34.3797	16.24%	0.94198
SO2	1.6107	0.0421	0.3535	12.18%	23.5213	11.11%	0.91249
NO2	0.0130	0.0394	0.0962	21.52%	4.4931	2.12%	0.09865
O ₃	0.0215	0.0389	0.0371	36.38%	0.2911	0.14%	0.00378
PM10	1.4153	0.0411	0.2678	50.84%	17.0631	8.06%	0.15858
PM2.5	1.1401	0.0405	0.2111	18.01%	12.8531	6.07%	0.3372
VOC	0.0490	0.0387	0.0006	14.67%	0.1131	0.053%	0.00036

灵敏度分析结果表明, NO 和 SO₂ 减排量对整个城市 GDP 影响最为显著, 灵敏度因子分别达到了 0.94 和 0.91, 其次是 PM2.5, 灵敏度因子为 0.34, 故对这 3 类污染物及其对应的产业类型, 具体治理时应该谨慎。图 16 给出了选取 8 种污染物的污染指数和单位 GDP 排放量对比结果, 可以看出就单位 GDP 排放量而言, 污染物差别不大, 但是带来的环境污染差别很大。因此在对多个污染物进行综合治理时, 应该重点针对那些环境污染指数较大同时对 GDP 冲击影响很小的类型。

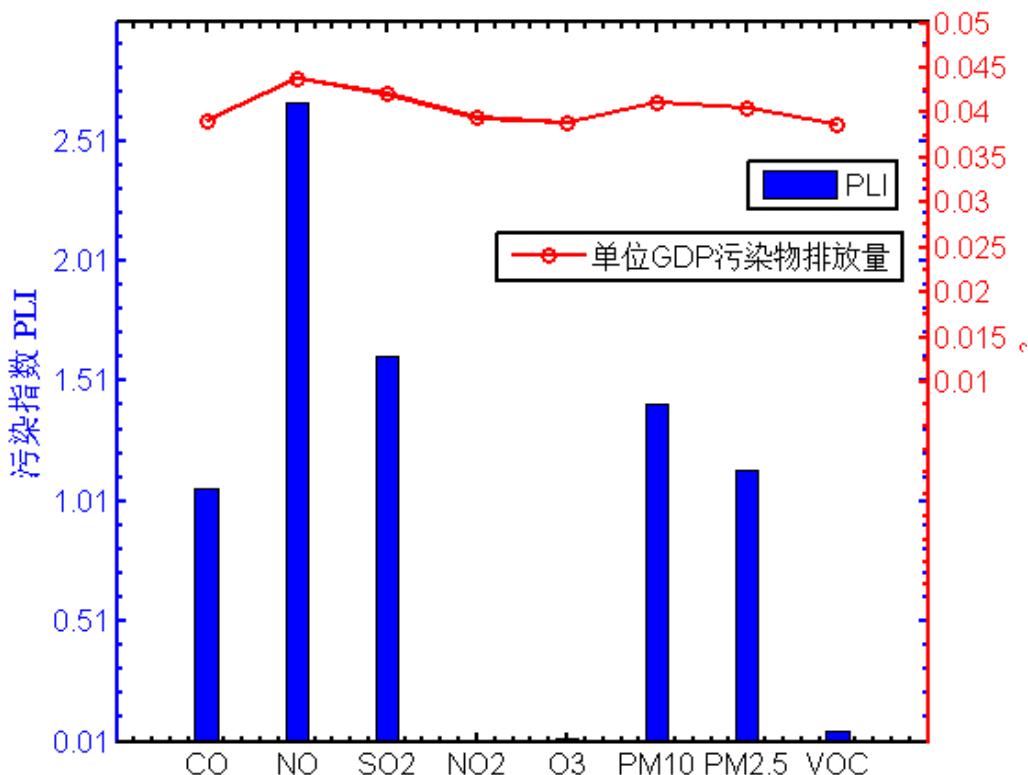


图 16 8 种污染物的污染指数和单位 GDP 排放量

由此原则,从表 23 种取污染指数为 1.0 为界,按照灵敏度从小到大排序,便可得出最优的治理组合方案, 分别是 CO、PM10、PM2.5,如表 24 所示。可以看出仅仅治理 CO 及其对应的污染产业时, GDP 从 211.06 亿元下降到 210.07 亿元,环境污染指数为 1.0599,单位 GDP 综合排放量为 0.039 亿立方米/亿元; 组合治理 CO 和 PM10 及其对应的污染产业时,累计 GDP 总量下降到 190.43 亿元,累加排放总量为 7.943 亿立方米,单位 GDP 排放量为 0.0417 亿立方米/亿元,环境污染指数为; 三者同时治理时,累计 GDP 总量下降到 174.22 亿元,累加排放总量为 7.732 亿立方米,单位 GDP 综合排放量为 0.04438 亿立方米/亿元,环境污染指数为 $\sqrt[3]{1.0599 \times 1.4153} = 1.2247$; 三者同时治理时,累计 GDP 总量下降到 174.22 亿元,累加排放总量为 7.732 亿立方米,单位 GDP 综合排放量为 0.04438 亿立方米/亿元,综合环境指数为 $\sqrt[3]{1.0599 \times 1.4153 \times 1.1401} = 1.1958$ 。

表 24 污染物治理最优化组合方案

污染物	污染指数 PLI	排放降低总量 (亿立方米)	排放量相对 降低百分比	累加 排放 量	累计 GDP 总量	单位 GDP 综合 排放量 (亿立方米/亿元)
CO	1.0599	0.0547	23.22%	8.211	210.07	0.039
PM10	1.4153	0.2678	50.84%	7.943	190.43	0.0417
PM2.5	1.1401	0.211	18.01%	7.732	174.22	0.04438

5.7 基于研究分析的治理建议

首先,根据5.2中对EKC曲线的回归分析,可以得出判断该市采用了边污染边治理的经济发展模式。接着,在5.3中由主要大气污染物浓度空间分布图可最终得出各种污染物的污染区域范围。其中,居首的NO的污染浓度区域数为4。这表明NO的集中排放区域最为广泛。通过使用污染负荷指数法计算城市中各个功能区的污染负荷指数(PLI_{zone}),可得出结论工业区属于强污染,而其余各区均属于中等污染。然后,5.4中使用了相关和主成分分析来进行污染物源剖析,解析大气污染物的源头和种类。该城区的主要大气污染物为: NO_2 、NO、 SO_2 、 $PM_{2.5}$ 。大气污染物的主要原因是:交通废气、粉尘、生活垃圾和废弃物分解。接下来,5.5中继续细化了考虑非稳态传播因素下各种污染物的分布情况和具体产业的污染状况。给出结论为: CO、NO、 O_3 、PM10和 PM2.5的污染源分别是工厂、汽车尾气、工矿企业、燃煤的粉尘和靠近工业区的化工企业排放。产业方面,由污染源所处区域

类型划分可以看出,污染最严重的是交通业和工业。

由5.1-5.5完成了从相关分析到物理扩散分析的计算之后, 5.6中提出了相应的优化治理方案,从多变量目标优化角度考虑:一方面追求污染指数 PLI 最小化 ;另一方面追求单位GDP产值的排污量 $\frac{P}{G}$ 最小化。经过分析,可知最好的方案分别是 CO、PM10、PM2.5。因此,为了追求经济效益和社会效益的局部最优,政府应对CO、PM10、PM2.5排放量较大的燃煤及化工企业进行有计划的减排。在煤炭方面,可以采用实施煤改气、煤改电或锅炉改造工程、推广煤炭高效燃烧技术、提高产煤质量、强化散煤燃烧管控等手段。在其他化工产业方面,可以向新能源倾斜;鼓励企业和学术机构研发和完善活性炭吸附法、催化燃烧法等污染治理新手段,从源头上减少污染。此外,还可以限制高尾气排放车辆(黄标车)进入城区、完善城市公共交通体系、认真落实工地防尘措施、加大宣传力度提升公民整体的环保意识,等等。

6.模型的评价

6.1 模型优点:

1. 模型是由简单到复杂慢慢完善的,可读性、理解性,逻辑性强;
2. 在建模中将一些既定的数据参数化使得模型可应用范畴更加广泛;
3. 利用计算机模拟的方法对类似计算成果做出了校验;
4. 各个大气污染物相关性的累计量少,分别对 5 个区举办各自相关性和主成份分析,得到的成效很好;
5. 二维非稳态对流扩散模型能比较充分考虑大气污染物的瞬态迁移特征时空分布演变规律。
6. 文章所成立的模型不仅能用在城市大气污染扩散还可以采用到城市其它污染问题的分析,另外本文的建模不涉及海拔,在后面的作业中可以利用海拔建立三维扩散模型,将更加符合实际情况。
7. 在大气污染治理经济学分析的基础上综合考虑了污染物的物理扩散问题,结合污染指数与 GDP 比较全面的给出优化方案的目标函数。

6.2 模型缺点:

1. 本文只对原始数据做出分析,而原始数据的间距大,对拟合区域的状貌和计算浓度的关联不利。
2. 污染指数的计算方法可以用来其它面的等级程度区分,利用变换浓度函数关系式找到更多的数据点,这样获得的结果更加精确。
3. 8 种大气污染物中分别对 5 个不一样的区域进行各自相关性和主成份分析,其中交通区成果差,因此有必要进行数据再处理。
4. 污染源的定位可用来解决最优选址,也可以用其它别的简单的参数估计方法求得,如粒子群算法、遗传算法等。

5.此外,由于收集到的数据比较单一,没有其他与大气污染物传播有关的数据,因此在建模求解时为了完善城市大气环境的演化模式,需要收集每年生活工业等区域的垃圾排放量和生物降解量,排污企业的个数,降雨量、河流所经区域等因素。

参考文献

- [1]. 王晨晓,张雅祺. 浅谈华北地区雾霾治理与经济效应[D],贵州财经大学,2013
- [2]天气后报网站,2019 年 1 月北京空气质量指数 AQI_PM2.5 历史数据,
<http://www.tianqihoubao.com/aqi/beijing-201901.html>.
- [3]. 中国环境监测总站,2019 年 1 月全国城市空气质量报告,2019.
http://www.cnemc.cn/jcbg/kqzlzkg/201903/t20190328_697744.shtml.
- [4]. 郭鑫. 雾霾的成因和防治问题[D],陕西科技大学,2013.
- [5]. 中国环境检测总站主编, 中国大气环境背景值[M], 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [6]. 张东辉. 北京市环境与污染治理模型分析[D], 首都经济贸易大学, 2007.

- [6]. 赵云君,文启湘. 环境库兹涅茨曲线及其在我国的修正[J], 经济学家, 2004(5):69-75.
- [7]. 林艳. 基于地统计学与 GIS 的土壤重金属污染评价与预测[J]. 中南大学, 2009.
- [8]. 徐争启, 倪师军. 应用污染负荷指数法评价攀枝花地区金沙江水系沉积物中的重金属[J], 四川环境, 2004,23(3):64-67.
- [9]. 刘启运. 经济系统规划方法和模型[M], 北京:中国出版社,1993.
- [10]. 宋新山. MATLAB 在环境科学中的应用[M], 北京:化学工业出版社,2008
- [11]. 袁达. 中国工业经济与环境协调发展的经济计量研究[D], 华侨大学 1999.
- [12]. 刘小琴. 辽宁环境质量与经济增长关系的实证研究[D], 大连理工大学, 2004.
- [13]. 杨瑞丰, 张树柏.投入产出法在化工管理中的应用[M], 化学工业出版社, 1998.
- [14]. 廖明球. 经济、资源、环境投入产出模型研究[M], 首都经济贸易大学出版社, 2005.

附录：

附录 1:

附件 1. 8 种主要空气污染物的浓度

编号	CO (mg/m ³)	NO (μg/ m ³)	SO ₂ (μg/ m ³)	NO ₂ (μg/m ³)	O ₃ (μg/ m ³)	PM ₁₀ 可 吸入颗粒 物(μg/m ³)	PM _{2.5} 细 颗粒物 (μg/m ³)	挥发性 有机物 (mg/m ³)
1	24.00	107.66	177.24	12.34	6.65	40.95	49.53	0.109
2	18.15	102.34	180.20	13.51	2.15	38.70	50.65	0.142
3	15.00	307.44	116.28	38.74	2.73	23.85	104.05	0.328
4	20.08	156.73	160.32	15.10	23.75	34.65	45.19	0.176
5	19.44	367.64	237.40	70.52	20.00	45.45	237.94	1.089
6	43.10	765.03	271.84	185.17	26.00	63.45	608.72	1.450
7	27.37	188.86	383.32	26.89	3.03	40.05	88.07	0.250
8	29.45	746.34	1142.32	1517.09	337.50	93.83	534.30	2.127
9	22.68	786.73	352.68	90.98	400.00	58.05	241.30	1.390
10	26.69	186.97	262.24	17.79	1.58	48.83	51.72	0.151
11	18.15	140.98	180.76	14.94	6.48	32.85	50.23	0.154
12	28.07	200.90	175.76	27.46	4.20	44.33	87.84	0.335
13	17.51	135.59	321.40	15.94	2.78	44.55	80.70	0.134
14	13.74	251.65	1032.60	73.96	1.93	29.03	149.06	1.281
15	16.87	361.48	367.88	53.42	4.73	44.55	170.41	0.742
16	35.05	731.15	379.12	82.18	5.05	50.18	661.47	0.903
17	18.80	311.78	330.76	100.43	3.60	41.40	155.74	0.585
18	24.00	243.53	230.60	58.28	5.33	44.10	99.15	0.461
19	22.68	241.99	637.80	42.62	2.13	40.73	125.08	0.571
20	26.02	429.80	2977.84	78.33	3.90	73.80	320.10	1.520
21	16.87	180.04	218.56	17.41	2.60	29.70	122.75	0.335
22	30.12	849.45	3683.36	818.91	2.88	320.63	254.07	2.728
23	28.74	228.06	689.16	62.93	2.05	70.88	127.26	0.644
24	10.10	148.47	200.52	23.17	3.48	23.85	93.77	0.279
25	12.52	63.35	140.08	7.09	0.40	23.40	40.73	0.070
26	18.80	408.38	381.00	140.22	3.88	47.48	136.46	0.467
27	16.26	256.48	169.36	38.79	4.70	39.15	93.95	0.274
28	11.30	226.73	140.56	20.80	1.25	31.28	91.67	0.380
29	66.95	297.15	293.60	35.83	38.00	62.55	117.18	0.264
30	56.27	441.00	386.72	68.89	16.13	78.30	182.50	2.439
31	32.23	444.71	256.12	60.81	4.75	63.68	227.70	0.923
32	10.71	324.38	448.76	43.76	2.95	31.73	84.84	0.290
33	19.44	372.40	230.04	50.26	4.78	43.88	102.84	0.446
34	16.87	545.09	298.64	55.49	8.25	44.33	154.28	0.527
35	13.74	528.36	399.52	58.75	6.08	56.03	141.11	0.485
36	10.71	277.41	553.48	35.38	4.25	54.45	128.46	4.340

37	16.87	481.46	342.08	43.71	5.03	42.75	144.48	0.605
38	13.13	368.20	221.24	48.86	2.33	44.78	140.91	0.555
39	13.13	314.37	268.88	30.98	7.88	35.33	149.76	0.442
40	20.08	596.89	290.36	95.20	7.78	47.70	173.94	0.566
41	50.76	321.30	379.16	28.30	47.50	44.78	99.85	0.323
42	22.68	236.11	309.08	149.31	2.25	45.23	139.41	0.315
43	18.15	397.67	300.56	70.90	3.38	53.55	156.16	0.859
44	14.36	419.30	276.20	73.31	3.03	44.55	143.81	0.641
45	15.00	444.85	273.68	136.66	4.40	43.88	134.86	0.808
46	16.26	420.49	178.60	27.06	1.28	34.88	92.22	0.279
47	13.13	397.32	241.00	29.20	1.15	36.23	89.24	0.312
48	16.87	159.95	197.08	18.51	1.55	51.53	64.30	0.153
49	14.36	398.02	1224.08	42.25	22.50	37.80	111.54	0.295
50	22.04	150.29	201.32	24.10	3.90	46.80	66.86	0.606
51	16.26	106.33	188.96	14.66	3.50	38.93	52.49	0.139
52	15.00	240.31	168.04	35.29	2.00	31.05	110.70	0.414
53	15.00	205.73	241.16	30.62	1.33	28.35	106.30	0.418
54	11.91	219.03	135.16	166.69	1.38	31.50	95.54	0.443
55	11.30	221.13	181.72	20.43	1.38	28.35	87.98	0.294
56	9.52	291.41	231.52	28.58	4.18	26.78	162.67	0.363
57	11.91	261.80	180.68	30.11	0.88	33.75	81.35	0.236
58	11.91	241.01	141.16	28.72	2.50	33.98	187.21	0.212
59	8.91	177.03	183.92	42.92	0.80	32.40	60.19	0.219
60	10.10	352.38	154.96	18.28	0.91	16.20	75.22	0.154
61	15.00	212.66	224.08	39.52	1.58	90.11	126.97	5.641
62	12.52	88.90	110.32	14.39	0.75	26.84	80.46	0.128
63	8.91	185.50	142.64	17.63	0.62	20.77	84.76	0.184
64	8.33	195.23	173.72	19.57	1.61	22.28	74.76	0.204
65	9.52	525.84	212.44	32.28	0.70	23.54	84.38	0.233
66	10.10	252.91	190.16	31.37	0.64	20.50	158.84	0.327
67	10.10	341.60	204.72	20.73	0.94	24.30	76.47	0.189
68	18.80	158.90	168.60	40.22	1.23	36.70	47.99	0.124
69	11.30	243.18	151.04	11.98	0.67	22.52	76.17	0.332
70	13.74	95.20	146.24	13.84	0.54	33.66	47.87	0.118
71	9.52	228.97	103.92	14.24	0.64	22.03	89.33	0.207
72	24.67	79.17	209.60	12.49	1.63	44.30	41.38	0.093
73	11.30	189.35	132.48	34.71	0.64	30.38	86.86	0.177
74	11.30	112.21	153.16	15.65	0.64	32.15	56.18	0.124
75	10.71	213.85	158.00	18.52	0.78	33.17	86.65	0.223
76	8.33	49.63	77.80	5.47	0.38	15.95	31.82	0.049
77	26.02	182.91	183.88	14.90	1.29	40.50	60.75	0.127
78	5.42	83.86	61.28	8.00	0.21	13.93	36.83	0.072
79	7.74	328.16	148.16	19.22	1.13	27.34	91.35	0.268

80	11.30	105.49	238.44	11.40	0.86	56.21	53.86	0.134
81	18.80	70.21	149.96	12.14	0.86	33.41	41.01	0.093
82	33.64	76.86	224.28	41.44	1.47	46.58	54.42	0.095
83	19.44	64.26	144.48	10.15	0.91	28.10	37.81	0.072
84	92.23	520.73	196.12	15.71	0.70	39.74	101.86	0.273
85	11.91	291.76	148.16	14.27	0.56	25.83	76.23	0.158
86	8.91	258.86	145.36	31.49	0.56	17.98	58.83	0.126
87	6.00	135.80	72.32	9.70	0.67	15.71	56.38	0.142
88	21.37	35.07	164.08	8.55	0.43	30.13	37.20	0.061
89	8.91	139.16	112.84	11.54	0.35	21.51	66.93	0.142
90	18.15	620.62	170.76	16.87	1.10	47.59	132.50	0.245
91	18.15	90.23	190.08	9.79	0.32	39.74	46.91	0.138
92	22.68	80.01	193.36	12.87	0.88	37.22	50.16	0.096
93	13.13	163.03	116.68	24.01	42.86	22.03	54.11	0.143
94	14.36	92.96	144.44	10.37	0.51	34.94	51.84	0.124
95	17.51	1133.86	173.92	9.30	0.51	34.67	43.39	0.086
96	20.72	197.75	167.88	31.68	0.70	41.27	68.74	0.157
97	13.74	126.42	148.92	11.22	0.70	26.84	51.03	0.096
98	9.52	270.62	143.72	15.83	0.62	27.59	84.00	0.236
99	8.91	241.50	161.84	91.33	0.59	34.94	81.27	0.256
100	13.13	66.92	89.96	10.29	2.14	22.79	39.16	0.101
101	23.36	60.97	183.32	8.90	0.75	32.92	40.95	0.073
102	18.15	142.10	143.88	10.13	0.38	32.65	64.16	0.134
103	7.16	247.10	98.12	7.62	0.29	20.25	82.32	0.134
104	8.91	163.24	99.68	12.97	2.14	18.74	63.28	0.150
105	17.51	122.01	135.32	17.67	0.51	29.36	58.94	0.107
106	7.16	61.32	73.84	5.84	0.35	20.00	34.20	0.065
107	20.08	171.92	146.92	36.78	1.39	31.91	66.14	0.171
108	14.36	117.53	132.60	11.38	1.50	35.96	46.84	0.084
109	19.44	77.98	115.28	35.50	5.17	26.33	39.23	0.092
110	15.61	66.22	311.68	12.20	0.59	64.55	36.29	0.088
111	14.36	78.12	98.28	7.25	0.78	19.24	37.97	0.066
112	10.71	59.85	105.32	14.93	0.91	25.56	37.48	0.096
113	14.36	118.65	156.44	13.51	0.64	35.96	55.34	0.124
114	13.74	96.60	138.08	21.32	1.26	28.35	35.63	0.079
115	10.10	91.98	143.88	6.77	1.10	24.82	42.08	0.093
116	8.91	28.70	167.08	7.50	0.43	38.48	27.55	0.118
117	12.52	90.79	107.32	6.07	1.02	17.46	40.38	0.102
118	17.51	103.60	146.92	8.53	1.31	28.35	38.01	0.087
119	15.00	75.67	90.88	5.64	0.88	20.00	45.35	0.104
120	15.00	92.75	318.08	11.20	1.07	62.28	39.62	0.138
121	12.52	114.03	135.16	7.78	0.75	29.12	40.84	0.112
122	18.15	62.16	209.64	9.18	0.27	44.80	40.07	0.096

123	8.91	144.69	69.84	7.21	0.78	12.40	75.31	0.119
124	8.33	85.26	79.92	4.63	0.62	18.23	38.22	0.087
125	7.16	161.77	145.92	7.68	0.94	39.74	40.63	0.145
126	7.74	90.02	87.00	5.46	0.75	21.51	31.88	0.087
127	11.91	88.76	200.04	7.64	1.34	42.03	41.16	0.105
128	7.16	55.79	297.44	16.49	0.24	102.26	29.71	0.131
129	7.16	205.87	170.72	7.36	1.98	34.94	116.82	0.149
130	6.00	166.81	78.84	15.13	0.48	14.94	92.74	0.214
131	8.33	76.51	74.08	7.53	0.48	22.03	36.48	0.092
132	9.52	48.58	91.72	4.54	0.67	17.21	30.93	0.080
133	10.71	108.99	133.20	7.25	1.07	25.56	39.27	0.077
134	8.33	76.51	79.32	8.72	0.48	21.26	48.38	0.071
135	5.42	143.85	693.36	16.69	1.04	166.57	77.99	0.345
136	10.71	37.24	140.60	4.75	0.51	25.07	34.86	0.052
137	7.74	28.00	76.32	1.37	0.38	17.73	33.81	0.081
138	28.07	57.96	255.52	14.91	0.29	70.88	30.35	0.115
139	22.68	155.68	124.40	23.10	3.56	19.49	180.04	0.201
140	17.51	115.36	197.76	16.79	3.16	30.62	52.70	0.114
141	24.67	135.80	167.16	18.86	5.33	30.62	63.73	0.191
142	17.51	217.07	225.60	22.27	3.46	36.97	83.48	0.232
143	26.69	717.43	310.44	42.74	3.21	43.54	318.36	2.084
144	20.72	344.96	151.44	21.37	3.56	30.13	159.78	0.178
145	20.08	141.61	133.12	22.60	33.48	25.56	196.87	0.166
146	20.72	68.04	154.68	10.87	0.62	33.17	40.28	0.075
147	21.37	146.02	164.00	17.13	1.69	34.18	131.36	0.127
148	18.80	100.38	166.68	13.54	2.22	28.10	53.40	0.098
149	20.48	110.67	146.44	9.73	0.90	29.05	44.34	0.095
150	24.49	232.82	308.24	27.61	6.00	55.06	95.34	0.389
151	20.48	281.26	339.76	36.07	3.45	43.11	135.46	0.341
152	25.19	529.48	170.92	52.51	1.58	43.34	124.24	0.277
153	28.62	285.25	222.16	37.10	2.80	54.11	93.55	0.312
154	27.24	215.11	217.56	34.33	8.15	57.87	184.70	0.385
155	11.54	169.47	123.72	19.28	0.70	26.01	70.84	0.217
156	16.56	125.23	118.16	14.24	1.30	22.25	69.78	0.178
157	23.82	220.85	199.04	16.82	13.75	42.64	64.02	0.164
158	17.20	94.22	101.32	11.46	1.13	26.24	56.70	0.131
159	16.56	164.92	147.52	29.28	1.08	31.64	75.05	0.320
160	14.02	142.66	156.12	14.51	2.18	37.49	74.33	0.208
161	21.15	397.95	218.36	68.08	6.60	52.25	115.36	0.600
162	15.31	354.55	237.80	42.43	5.05	58.79	109.21	0.502
163	17.20	616.00	313.16	72.67	7.33	57.62	239.60	0.810
164	21.15	175.21	156.36	30.28	2.03	45.92	82.84	0.259
165	23.82	113.33	168.32	46.75	4.65	41.00	87.93	0.258

166	19.16	174.58	218.80	49.04	1.88	57.40	81.09	0.257
167	23.14	173.74	168.92	41.63	1.43	37.26	62.36	0.248
168	14.66	109.41	164.64	19.44	2.08	32.81	49.70	0.156
169	8.48	84.21	199.40	11.03	1.08	57.40	53.10	0.173
170	19.16	300.44	217.88	33.96	1.13	44.51	122.50	0.346
171	22.47	143.57	174.52	14.11	1.18	44.51	57.86	0.156
172	12.77	79.66	149.08	10.24	0.85	32.56	37.44	0.097
173	15.31	154.91	123.00	42.19	1.18	36.32	66.08	0.278
174	23.14	406.07	159.12	51.28	6.75	39.35	93.37	0.474
175	17.20	119.70	124.92	15.44	7.30	35.37	43.53	0.166
176	18.52	255.50	143.68	18.55	2.75	40.30	62.65	0.221
177	14.66	202.79	168.48	24.66	1.43	39.35	107.52	0.356
178	72.61	316.47	148.88	26.17	4.00	36.79	102.58	2.454
179	19.81	593.32	212.68	35.40	2.40	42.86	96.35	0.280
180	12.77	217.49	162.80	25.58	1.45	33.73	161.83	0.267
181	15.31	222.25	169.84	18.58	4.05	40.07	83.92	0.333
182	12.77	250.25	155.12	26.33	372.53	39.83	137.51	0.525
183	19.16	271.04	152.12	18.04	2.13	49.43	76.97	0.214
184	15.31	137.55	200.12	11.14	0.73	58.10	47.46	0.127
185	4.93	207.06	61.60	11.01	0.48	9.61	56.59	0.160
186	14.02	90.30	124.36	11.36	0.95	33.98	41.66	0.105
187	16.56	143.43	160.64	15.52	1.03	36.54	46.59	0.120
188	10.93	122.36	124.52	15.73	0.65	25.07	44.48	0.141
189	6.12	137.90	313.44	13.79	0.48	54.11	61.22	0.156
190	10.32	74.69	65.24	5.42	0.43	17.10	37.65	0.056
191	19.81	516.60	189.40	14.44	3.38	44.06	47.73	0.153
192	10.32	552.09	115.60	10.57	0.85	34.90	36.46	0.137
193	21.15	93.17	162.32	19.58	0.68	50.38	47.56	0.173
194	7.29	104.65	108.72	6.71	1.35	32.56	53.69	0.089
195	23.14	144.62	223.16	14.66	0.55	64.42	41.62	0.123
196	26.54	55.23	235.48	12.99	0.65	52.72	37.13	0.106
197	14.66	125.02	129.24	17.41	1.13	32.09	67.17	0.157
198	16.56	175.07	137.28	9.75	0.38	41.69	57.81	0.135
199	17.85	62.44	219.60	13.97	0.48	48.96	34.93	0.080
200	17.20	317.45	148.88	13.15	1.00	37.26	58.11	0.131
201	13.41	64.68	154.80	9.02	0.53	31.16	33.91	0.071
202	8.48	139.09	72.44	9.20	0.48	21.78	47.81	0.144
203	16.56	182.07	175.24	15.88	0.83	29.75	55.29	0.131
204	17.20	70.77	196.04	11.98	0.58	46.85	36.40	0.107
205	20.48	102.55	173.56	11.93	0.90	39.35	46.54	0.090
206	23.14	46.55	196.96	8.80	0.48	38.43	35.67	0.062
207	8.48	83.30	109.96	6.37	1.10	23.67	44.72	0.080
208	4.93	304.36	85.16	7.70	0.45	19.91	78.60	0.160

209	17.20	131.60	122.08	15.62	1.45	32.09	44.74	0.116
210	9.09	54.25	67.64	5.97	0.85	16.88	39.41	0.062
211	14.02	91.56	142.44	11.75	0.58	36.32	41.82	0.092
212	15.92	94.15	117.48	9.80	0.80	30.47	41.76	0.090
213	9.70	71.26	128.92	6.41	0.30	28.82	46.48	0.077
214	15.31	162.40	129.72	14.54	0.93	33.98	50.51	0.153
215	23.14	84.77	251.64	18.62	1.10	61.38	39.70	0.132
216	15.92	167.09	188.72	35.80	0.60	44.28	87.60	0.163
217	18.52	105.84	371.04	18.86	1.98	72.16	44.20	0.196
218	8.48	141.82	226.16	10.85	1.23	63.25	36.60	0.123
219	7.29	246.12	259.44	17.38	1.63	38.88	157.67	0.158
220	15.92	121.66	233.12	11.99	1.28	50.60	44.25	0.105
221	26.54	296.31	245.64	70.70	5.40	68.18	250.43	0.440
222	16.56	451.71	201.08	48.36	2.83	52.47	139.19	0.537
223	21.80	677.39	145.64	42.43	1.65	37.96	167.09	0.687
224	14.02	311.99	113.28	79.23	3.48	29.05	122.42	0.455
225	25.19	294.42	143.24	44.32	14.03	50.60	85.27	0.362
226	14.02	180.18	169.00	26.90	6.50	44.06	65.66	0.289
227	18.52	174.09	177.44	25.67	3.75	44.75	101.08	0.255
228	25.19	245.21	236.28	21.95	4.43	55.28	73.58	0.255
229	12.77	76.93	116.36	8.23	0.78	25.54	35.11	0.077
230	12.15	214.34	153.20	21.73	2.88	30.47	84.88	0.218
231	32.88	214.55	215.92	58.23	6.38	62.80	97.16	0.267
232	11.54	360.92	114.96	46.48	45.03	33.98	98.25	0.268
233	31.44	123.13	231.52	22.50	1.63	60.68	63.48	0.151
234	15.92	292.46	142.84	28.55	20.03	36.07	132.90	0.306
235	19.81	257.74	176.88	39.42	2.28	41.24	107.63	0.371
236	19.81	275.10	143.28	42.10	3.38	41.69	102.14	0.382
237	27.24	82.25	130.16	12.31	1.03	32.56	58.03	0.084
238	10.32	265.37	128.52	22.69	1.23	30.92	98.52	0.313
239	20.48	224.21	351.60	40.19	1.95	49.28	173.04	0.345
240	12.77	429.38	201.36	89.56	3.33	37.35	154.28	0.672
241	25.19	154.35	245.92	25.18	2.10	50.40	81.72	0.230
242	13.41	160.51	130.76	36.24	1.60	30.83	87.67	0.307
243	15.92	234.01	188.20	24.22	1.90	41.40	85.44	0.317
244	15.92	199.01	161.88	26.84	8.73	36.00	167.24	0.277
245	16.56	161.07	166.60	21.43	1.43	38.03	61.47	0.178
246	15.31	385.77	287.00	42.74	1.85	50.18	156.27	0.314
247	29.33	140.70	156.44	15.16	3.13	24.08	139.09	0.135
248	9.70	142.66	106.28	14.57	0.58	26.78	58.37	0.142
249	11.54	248.64	105.00	19.72	0.35	21.60	82.91	0.177
250	27.95	93.59	211.96	13.26	0.65	55.80	52.82	0.143
251	22.47	66.92	191.40	11.71	0.35	46.80	39.93	0.087

252	17.20	246.82	178.28	35.39	1.28	29.93	97.93	0.797
253	14.66	389.34	203.48	85.99	2.30	42.98	252.07	0.583
254	15.92	79.59	167.40	12.44	0.30	42.75	44.62	0.086
255	10.32	168.35	112.16	13.58	6.53	26.33	50.04	0.139
256	22.47	84.21	216.76	13.14	0.68	51.75	41.48	0.122
257	10.93	359.87	169.36	28.60	345.00	38.93	97.94	0.405
258	13.41	172.41	119.60	13.10	2.10	31.73	82.60	0.143
259	16.56	110.60	187.44	14.41	0.78	43.43	50.78	0.119
260	13.41	147.91	111.16	11.41	0.85	27.00	53.73	0.122
261	17.20	165.55	143.80	39.91	4.98	31.28	57.37	0.291
262	18.52	135.10	162.40	14.93	0.68	32.40	46.94	0.127
263	19.16	118.79	177.04	52.87	1.15	38.70	59.79	0.147
264	15.92	224.07	143.68	22.12	1.70	37.13	81.84	0.244
265	21.15	126.14	216.32	16.21	0.93	41.40	61.78	0.178
266	14.02	246.26	221.56	46.84	2.18	38.03	97.37	0.283
267	26.54	171.99	191.16	16.53	0.88	41.40	74.79	0.148
268	19.81	60.76	164.48	9.28	0.58	35.78	52.54	0.105
269	21.80	257.46	368.08	29.88	2.43	36.68	57.76	0.482
270	11.54	326.97	196.12	20.66	1.13	34.65	85.16	0.199
271	16.56	255.29	161.36	24.56	1.98	42.08	116.65	0.263
272	33.58	173.95	162.44	36.91	2.03	38.70	106.67	0.252
273	30.03	120.26	301.52	97.92	0.75	59.18	63.38	0.188
274	25.19	286.93	178.68	40.15	2.00	81.00	135.59	0.296
275	16.56	211.75	136.88	16.56	10.20	33.30	96.18	0.327
276	8.48	165.34	170.68	9.81	1.55	21.15	58.63	0.224
277	23.82	80.15	225.52	16.18	0.90	50.40	43.74	0.114
278	19.81	115.64	293.60	25.64	1.00	44.33	117.78	0.144
279	17.20	266.28	186.52	16.99	1.20	32.85	117.35	0.234
280	11.54	278.88	118.28	11.18	1.50	23.63	159.38	0.259
281	10.93	188.02	112.44	13.92	1.60	27.45	76.33	0.152
282	13.41	88.55	114.28	12.34	0.48	27.23	35.24	0.080
283	21.15	203.21	191.48	17.34	0.85	33.30	61.96	0.142
284	21.80	159.88	161.16	15.09	0.93	34.43	56.14	0.125
285	13.41	213.85	209.76	13.75	0.33	42.98	63.29	0.164
286	12.15	285.32	142.60	13.40	0.28	41.85	84.50	0.182
287	24.49	67.62	77.68	6.76	0.30	16.88	38.56	0.071
288	10.93	129.85	92.60	8.05	0.85	21.38	41.29	0.139
289	10.32	202.09	104.48	9.06	0.45	23.18	42.20	0.096
290	9.70	63.28	64.80	4.98	0.80	15.75	62.03	0.067
291	9.09	199.78	107.44	9.00	1.63	29.93	54.08	0.102
292	21.80	70.00	184.60	11.66	0.35	51.75	30.81	0.099
293	17.20	214.83	168.08	15.13	1.00	43.20	51.79	0.212
294	17.85	223.65	173.28	15.53	1.35	35.55	57.37	0.125

295	12.15	70.07	86.76	7.18	1.00	17.78	59.91	0.104
296	9.70	153.02	158.04	9.16	0.85	23.63	71.37	0.126
297	8.48	167.86	104.24	9.49	0.88	22.95	58.00	0.121
298	9.70	109.76	78.92	5.00	1.05	17.10	54.89	0.107
299	9.09	196.77	114.24	6.85	1.20	28.35	53.13	0.122
300	9.70	99.75	147.00	5.96	1.08	29.93	45.65	0.092
301	5.51	136.85	114.12	4.39	0.90	21.83	52.37	0.076
302	9.70	107.73	83.60	4.93	0.93	17.10	43.92	0.057
303	11.54	72.94	121.36	7.40	0.60	26.55	55.03	0.086
304	14.66	50.47	262.16	6.93	0.88	44.55	36.46	0.071
305	10.93	133.56	125.32	6.40	1.63	35.33	72.18	0.141
306	19.81	198.03	210.72	12.20	0.63	51.53	45.54	0.155
307	22.47	104.30	176.88	12.08	0.83	36.00	49.60	0.222
308	25.19	84.91	173.16	18.98	2.15	25.65	46.49	0.070
309	32.88	335.44	385.12	17.54	2.45	56.93	112.50	0.169
310	35.76	609.35	283.36	21.10	7.55	65.48	109.41	0.653
311	22.47	195.30	205.00	16.77	1.10	50.63	71.68	0.176
312	18.52	113.40	144.88	10.75	0.88	31.95	50.97	0.092
313	16.56	634.90	172.32	21.89	0.25	32.63	57.43	0.182
314	19.16	93.03	170.36	9.95	0.68	36.45	49.73	0.095
315	19.81	137.90	152.72	12.65	1.60	41.85	56.25	0.252
316	19.81	70.49	144.76	7.99	1.05	25.88	48.08	0.084
317	14.66	83.37	143.04	11.83	1.10	22.28	55.52	0.101
318	23.14	44.45	134.60	13.14	1.50	28.13	57.81	0.091
319	28.62	109.20	229.44	18.64	1.48	58.05	71.44	0.144

附件 2. 取样点位置及其所属功能区

编号	x(m)	y(m)	功能区
1	74	781	4
2	1373	731	4
3	1321	1791	4
4	0	1787	2
5	1049	2127	4
6	1647	2728	2
7	2883	3617	4
8	2383	3692	2
9	2708	2295	4
10	2933	1767	4
11	4233	895	5
12	4043	1895	1
13	2427	3971	1
14	3526	4357	4
15	5062	4339	4

16	4777	4897	1
17	5868	4904	4
18	6534	5641	1
19	5481	6004	4
20	4592	4603	1
21	2486	5999	1
22	3299	6018	4
23	3573	6213	1
24	4741	6434	5
25	5375	8643	1
26	5635	7965	4
27	5394	8631	4
28	5291	7349	4
29	4742	7293	2
30	4948	7293	2
31	5567	6782	2
32	7004	6226	4
33	7304	5230	1
34	7048	4600	4
35	8180	4496	4
36	9328	4311	1
37	9090	5365	4
38	8049	5439	4
39	8077	6401	1
40	8017	7210	4
41	6869	7286	4
42	7056	8348	1
43	7747	8260	4
44	8457	8991	4
45	9460	8311	4
46	9062	7639	4
47	9319	6799	4
48	10631	6472	4
49	10685	5528	4
50	10643	4472	4
51	11702	4480	4
52	11730	5532	4
53	11482	6354	4
54	10700	8184	4
55	10630	8774	4
56	11678	8618	4
57	11902	7709	4
58	13244	7056	4

59	12746	8450	4
60	12855	8945	4
61	13797	9621	4
62	14325	8666	3
63	15467	8658	1
64	12442	4329	4
65	13093	4339	4
66	13920	5354	4
67	14844	5519	1
68	16569	6055	1
69	16387	6609	5
70	16061	7352	5
71	15658	7594	4
72	14298	7418	1
73	14177	6684	4
74	15092	6936	5
75	12778	5799	4
76	17044	10691	3
77	17087	11933	4
78	17075	12924	4
79	17962	12823	4
80	18413	11721	3
81	19007	11488	3
82	18738	10921	3
83	17814	10707	4
84	18134	10046	4
85	17198	9810	4
86	17144	9081	4
87	18393	9183	4
88	19767	8810	4
89	21006	8819	4
90	21091	9482	4
91	22846	9149	4
92	23664	9790	3
93	22304	10527	4
94	21418	10721	1
95	21439	11383	4
96	20554	11228	4
97	20101	10774	4
98	21072	10404	4
99	20215	9951	4
100	18993	12371	3
101	19968	12961	3

102	21766	12348	4
103	22674	12173	2
104	22535	11293	3
105	25221	5795	4
106	26453	5577	1
107	26416	6508	1
108	27816	5581	3
109	25361	6423	3
110	24065	7353	3
111	25998	7032	3
112	27177	7771	3
113	26424	8639	4
114	26073	8807	3
115	24631	9422	3
116	24702	9522	3
117	25461	9834	3
118	24813	10799	4
119	26086	11094	3
120	26015	12078	3
121	27700	11609	3
122	27696	11621	3
123	27346	13331	3
124	26591	13715	3
125	27823	14737	3
126	27232	14482	3
127	24580	13319	3
128	24153	12450	3
129	22965	13535	3
130	23198	13523	4
131	24685	14278	3
132	28654	8755	3
133	24003	15286	3
134	21684	13101	3
135	22193	12185	3
136	17079	5894	3
137	15255	5110	3
138	15007	5535	3
139	3518	2571	5
140	3469	2308	5
141	3762	2170	5
142	3927	2110	5
143	4153	2299	5
144	3267	793	5

145	4684	1364	5
146	5495	1205	5
147	5664	1653	5
148	5541	2093	5
149	5451	2757	5
150	4020	2990	4
151	4026	3913	4
152	5101	4080	1
153	5438	3994	2
154	5382	3012	1
155	5314	2060	4
156	5503	1127	1
157	5636	133	1
158	6605	374	1
159	7093	1381	4
160	7100	2449	4
161	6837	3490	4
162	7906	3978	4
163	8045	3052	4
164	8394	2035	4
165	8403	1075	4
166	8079	0	4
167	9663	1288	4
168	9469	2286	4
169	9178	3299	4
170	9095	3975	4
171	10225	3821	4
172	10210	2789	4
173	10340	1764	4
174	11557	1581	4
175	11415	2585	4
176	11649	3515	1
177	12734	4015	2
178	12696	3024	4
179	12400	2060	4
180	12591	1063	1
181	13765	1353	4
182	13694	2357	4
183	13855	3345	1
184	14862	2524	1
185	14896	1603	2
186	15387	729	1
187	15810	2307	1

188	16032	3061	4
189	15801	3966	3
190	15087	3512	5
191	16872	2798	4
192	17734	3629	4
193	16823	4207	5
194	17008	4775	3
195	17203	6218	1
196	17005	7212	4
197	16947	7487	2
198	16301	8299	1
199	17904	8287	1
200	18303	7385	5
201	18438	6539	4
202	18556	5588	5
203	18954	4874	4
204	18012	4414	4
205	19072	8519	4
206	20282	8590	4
207	21475	8540	3
208	21450	7555	4
209	20261	7586	3
210	19569	7348	3
211	19411	6934	3
212	19501	6091	4
213	20582	6548	5
214	19909	5300	4
215	21018	5764	4
216	22176	5492	4
217	23359	5325	3
218	23238	6502	3
219	22624	4818	3
220	21703	6591	3
221	5006	8846	2
222	5734	9659	4
223	6395	10443	2
224	7405	10981	2
225	8446	11200	2
226	7612	11938	2
227	7912	12840	4
228	8866	13143	2
229	9296	13102	4
230	9475	12000	2

231	9212	11305	2
232	8629	12086	2
233	7776	10613	2
234	8622	10638	4
235	9237	9872	4
236	8307	9726	4
237	7106	9467	2
238	6423	8831	2
239	7458	8920	2
240	8904	8868	4
241	10547	9591	4
242	10398	10360	4
243	10395	11203	1
244	11529	11243	4
245	11563	10298	4
246	11646	9381	2
247	12641	9560	2
248	14000	8970	2
249	14207	9980	2
250	14065	10987	4
251	12734	10344	3
252	12727	7691	4
253	14173	11941	5
254	15467	12080	1
255	15140	11101	2
256	15198	10100	4
257	15248	9106	4
258	16428	9069	1
259	16289	10072	1
260	16267	11058	4
261	16440	12068	4
262	16440	13232	2
263	15412	12982	4
264	14269	12877	4
265	13277	13204	4
266	13175	12238	4
267	12153	12336	1
268	11958	13313	1
269	10800	13282	1
270	10022	12204	2
271	9333	14631	2
272	9277	16148	1
273	11121	16432	1

274	10856	14727	2
275	12644	14943	2
276	12625	16259	1
277	9036	17538	2
278	10599	17980	2
279	12632	17949	4
280	14405	18032	3
281	14074	16516	3
282	14262	15129	3
283	14624	14004	4
284	16629	14481	4
285	18470	14411	4
286	20591	13549	3
287	20983	15862	3
288	20177	17642	3
289	19041	15769	4
290	18906	16346	3
291	18467	17001	3
292	17414	15476	4
293	15748	15728	4
294	15517	17034	5
295	16607	17365	3
296	15952	18397	3
297	22605	14301	3
298	23146	15382	3
299	22046	17634	3
300	23785	17643	3
301	25981	18051	3
302	27380	18202	3
303	25021	16290	4
304	23325	16701	3
305	26852	16114	3
306	17981	18449	1
307	14482	12692	5
308	14318	13569	5
309	10352	17133	5
310	9095	16414	5
311	10510	15314	5
312	13954	5615	5
313	10142	1662	5
314	17765	3561	5
315	6924	5696	5
316	4678	3765	5

317	6182	2005	5
318	5985	2567	4
319	7653	1952	5

附件 3.5 个功能区说明

功能区	
1	生活区
2	工业区
3	山区
4	交通区
5	农田区

附录 2

大气污染物空间分布及优化方案 Matlab 程序

```

clc
clear
close all
load air_pollute.dat
figure('color','white');
CO=air_pollute(:,5);
NO=air_pollute(:,6);
SO_2=air_pollute(:,7);
NO_2=air_pollute(:,8);
O_3=air_pollute(:,9);
PM_10=air_pollute(:,10);
PM_25=air_pollute(:,11);
VOC=air_pollute(:,12);
CO_background=max(CO);
NO_background=max(NO);
SO_2_background=max(SO_2);
NO_2_background=max(NO_2);
O_3_background=max(O_3);
PM_10_background=max(PM_10);
PM_25_background=max(PM_25);
VOC_background=max(VOC);
CO_trans_para=[0.217,0.551, 0.849, 0.178];
NO_trans_para=[0.864,0.349, 0.190, 0.806];
SO_2_trans_para=[0.530, 0.736, 0.029, 0.865];
NO_2_trans_para=[0.771, 0.349, 0.299, 19.810];
O_3_trans_para=[5.504, 2.564, 4.936, 3.150];
PM_10_trans_para=[0.459, 0.093, 0.691, 0.364];
PM_25_trans_para=[7.436, 1.266, 6.136, -3.607];
VOC_trans_para=[1.019, 1.763, -4.300, 2.480];

CO_source=[4742, 7293, 66.95, 2, 0.2356;
12696, 3024, 72.61, 4, 0.2356;
18134, 10046, 92.23, 4, 0.2356];
NO_source=[1647, 2728, 765.03, 2, 2.87;
2708, 2295, 786.73, 4, 2.87];

```

```
3299,6018,849.45,4,2.87;
21439, 11383, 1133.86,4,2.87];

SO_2_source=[2383, 3692,1142.32,2,2.902;
10685, 5528,1224.08,4,2.902;
4592,4603,2977.84,1,2.902;
3299,6018,3683.36,4,2.902];

NO_2_source=[3299, 6018,818.91,4,0.447;
2383,3692,1517.09,2,0.447];

O_3_source=[15248,9106,345,4,0.102;
13694,2357,372.53,4,0.102;
2708,2295,400,4,0.102];

PM_10_source=[22193,12185,166.57,3,0.5267;
3299,6018,320.63,4,0.5267];

PM_25_source=[4777,4897,661.47,1,1.172;
2383,3692,534.3,2,1.172];

VOC_source=[2383,3692,2.127,2,0.0041;
12696, 3024,2.454,4,0.0041;
3299,6018,2.728,4,0.0041;
9328,4311,4.34,1,0.0041;
13797, 9621,5.641,4,0.0041;
2383,3692,2.127,2,0.0041];

zData=VOC; %%%%%%set1
xData = air_pollute(:,2);
yData = air_pollute(:,3);
minx = min(xData);
maxx = max(xData);
miny = min(yData);
maxy = max(yData);
tx = linspace(minx,maxx)';
ty = linspace(miny,maxy)';
[XI,YI] = meshgrid(tx,ty);
disx=maxx-minx;
disy=maxy-miny;
row=size(XI,1);
ZI = griddata(xData,yData,zData,XI,YI,'v4');

for i=1:row
    for j=1:row
        if ZI(i,j)<0
            sum_dxy=0;
            sum_pollte=0;
            for k=1:319
                dx=XI(i,j)-xData(k);
```

```
dy=YI(i,j)-yData(k);
weigh=exp(-dx^2/disx^2-dy^2/disy^2);
sum_pollte=sum_pollte+zData(k)*weigh;
sum_dxy=sum_dxy+weigh;
end
ZI(i,j)=sum_pollte/sum_dxy;
end
end
%mesh(XI,YI,ZI), hold on
surf(XI,YI,ZI), hold on
%plot3(xData,yData,zData,'o'), hold off
set(gca,'linewidth',2);
set(gca,'xminortick','on')
set(gca,'yminortick','on')
set(gca,'FontSize',12)
xlabel('X (m)');
ylabel('Y (m)');
%title('Eexpint Function');
set(get(gca,'title'),'FontSize',13,'FontName','Times New Roman');%设置标题字体大小,字型
set(get(gca,'XLabel'),'FontSize',13,'FontWeight','normal','FontName','Times New Roman');%设置 X 坐标标题字体大小,字型
set(get(gca,'YLabel'),'FontSize',13,'FontWeight','normal','FontName','Times New Roman');%设置 X 坐标标题字体大小,字型
shading interp;
grid off
box on
colorbar('location','eastoutside');
h = legend('VOC',4); %%%%%%%set2
set(h,'Interpreter','none','fontsize',12)
colormap(jet);
view(2);

%%%%%%% base on unsteady state heat source solution to describe filed
%distribution of air pollution
% source place stay constant for anywhere stay not less than the initial
% all the reference concentration is the lest background value
% 23.81e-3 m^3/s23.81e-3*1.1e3*365*24*3600=8.26 亿立方米
load Matri_A.dat
load Matri_B.dat
load CO_reduction.dat;
load NO_reduction.dat;
load SO_2_reduction.dat;
load NO_2_reduction.dat;
load O_3_reduction.dat;
load PM_10_reduction.dat;
load PM_25_reduction.dat;
load VOC_reduction.dat;
Z_pollut=ZI;
for kk=1:6
```

```

sourc_num=size(VOC_source,1); %%%%%%%set3
reduction=VOC_reduction(:,kk);%%%%%%set4
source=VOC_source;%%%%%%set5
trans_para=VOC_trans_para;%%%%%%set6
background=VOC_background;%%%%%%set7
air_pollu=zeros(row);
A=Matri_A(8,:); %%set8
B=Matri_B(8,:); %%set9
pollu_index=1;

for i=1:row
    for j=1:row
        x=XI(i,j);
        y=YI(i,j);
        air_pollu(i,j)=0;

        sum_A=0;
        for k=1:sourc_num
            coef_A=A(source(k,4));
            sum_A=sum_A+coef_A;
        end

        for k=1:sourc_num
            x0=source(k,1);
            y0=source(k,2);
            coef_A=A(source(k,4));
            tao=3600*24*1.5; %%set10
            %%C0 3 4 4 2 32 2 6   1.5*3+4+4+2+3+2*0.01+500*2+15*6=1.1e3
            %
            M=source(k,3)+source(k,5)*1e8*coef_A/sum_A/365/24/3600*tao/1e6/H*(1-reduction(k))*1.
            05*10^9;%set11
            %
            M=source(k,3)+1.5*23.81e-3*tao*1.05*10^6/1e6/H*(1-reduction(k));%%%
            C0
            3
            %
            M=source(k,3)+23.81e-3*tao*1.05*10^9/1e6/H*(1-reduction(k)); %%NO 8
            %
            M=source(k,3)+23.81e-3*tao*1.05*10^9/1e6/H*(1-reduction(k)); %%SO_2 8
            %
            M=source(k,3)+23.81e-3*tao*1.05*10^9/1e6/H*(1-reduction(k)); %%NO_2 8
            %
            M=source(k,3)+23.81e-3*tao*1.05*10^9/1e6/H*(1-reduction(k)); %%O_3 8
            %
            M=source(k,3)+0.01*23.81e-3*tao*1.05*10^9/1e6/H*(1-reduction(k)); %%PM_10 4
            %
            M=source(k,3)+500*23.81e-3*tao*1.05*10^9/1e6/H*(1-reduction(k)); %%PM_25 1.5-2
            %
            M=source(k,3)+15*23.81e-3*tao*1.05*10^6/1e6/H*(1-reduction(k));%%%
            VOC 1-2
            air_pollu(i,j)=air_pollu(i,j)+distri_pollute(M,x,y,x0,y0,tao,trans_para);
        end
        %
        Z_pollut(i,j)=air_pollu(i,j)+Z_pollut(i,j);
        Z_pollut(i,j)=air_pollu(i,j)+ZI(i,j);
        %%%%%%%计算污染指数%%%%%
        pollu_index=pollu_index*power(Z_pollut(i,j)/background,1/(row*row));
        %if (x==x0)&&(y==y0)
        %    Z_pollut(i,j)=ZI(i,j);
    end

```

```
%end
end
end
disp(['污染指数为',num2str(pollu_index)])
x=zeros(1,sourc_num);
x_redc=zeros(1,sourc_num);

sum_A=0;
for k=1:sourc_num
    coef_A=A(source(k,4));
    sum_A=sum_A+coef_A;
end

for k=1:sourc_num
    % x(k)=500*23.81e-3*365*24*3600*(1-reduction(k))/1e8;%%%%%%%%%%%%%
    coef_A=A(source(k,4));
    coef_B=B(source(k,4));
    x(k)=source(k,5)*(1-reduction(k))*coef_A/sum_A;%%%%%%%%%%%%% set12
    % x_redc(k)=1.5*23.81e-3*365*24*3600*reduction(k)/1e8*coef_B;%%%%%%%%%%%%% set13
    % x_redc(k)=23.81e-3*365*24*3600*reduction(k)/1e8*coef_B; %%%%%%%NO 8
    % x_redc(k)=23.81e-3*365*24*3600*reduction(k)/1e8*coef_B; %%%%%%%SO_2 8
    % x_redc(k)=23.81e-3*365*24*3600*reduction(k)/1e8*coef_B; %%%%%%% NO_2 8
    % x_redc(k)=23.81e-3*365*24*3600*reduction(k)/1e8*coef_B; %%%%%%%O_3 8
    % x_redc(k)=0.01*23.81e-3*365*24*3600*reduction(k)/1e8*coef_B; %%%%%%% PM_10
4
    x_redc(k)=source(k,5)*reduction(k)*coef_A/sum_A*coef_B; %%%%%%% PM_25 1.5-2
    % x_redc(k)=15*23.81e-3*365*24*3600*reduction(k)/1e8*(1+coef_B);%%%%%%%VOC
1-2
end
x=x'
reduction=reduction*100
X=8.26-sum(x_redc);
gdp=gdp_funct(X);
disp(['GDP 为',num2str(gdp),'亿元'])
disp(['污染物总排放量',num2str(X),'亿立方米'])
disp(['单位 GDP 排污量为',num2str(X/gdp)])
opt=pollu_index+X/gdp;
disp(['优化函数值为',num2str(opt)])

figure('color','white');
surf(XI,YI,Z_pollut), hold on
%set(gca, 'CLim', [200 1200]);
%plot3(xData,yData,zData,'o'), hold off
set(gca,'linewidth',2);
set(gca,'xminortick','on')
set(gca,'yminortick','on')
set(gca,'FontSize',12)
xlabel('X (m)');
ylabel('Y (m)');
%title('Eexpint Function');
```

```

set(get(gca,'title'),'FontSize',13,'FontName','Times New Roman');%设置标题字体大小,字型
set(get(gca,'XLabel'),'FontSize',13,'FontWeight','normal','FontName','Times New Roman');%
设置 X 坐标标题字体大小,字型
set(get(gca,'YLabel'),'FontSize',13,'FontWeight','normal','FontName','Times New Roman');%
设置 X 坐标标题字体大小,字型
shading interp;
grid off
box on
colorbar('location','eastoutside');
h = legend('VOC',4); %%%%%%%set14
set(h,'Interpreter','none','fontsize',12)
colormap(jet);
view(2);
end

```

附录 3

工业区:

工业区的 Pearson 相关矩阵								
	CO	NO	SO ₂	NO ₂	O ₃	PM ₁₀	PM _{2.5}	VOC
相关	CO	1.000	0.329	0.380	0.153	0.181	0.690	0.395
	NO	0.329	1.000	0.541	0.566	0.533	0.489	0.829
	SO ₂	0.380	0.541	1.000	0.920	0.902	0.698	0.675
	NO ₂	0.153	0.566	0.920	1.000	0.983	0.503	0.670
	O ₃	0.181	0.533	0.902	0.983	1.000	0.479	0.612
	PM ₁₀	0.690	0.489	0.698	0.503	0.479	1.000	0.578
	PM _{2.5}	0.395	0.829	0.675	0.670	0.612	0.578	1.000
	VOC	0.518	0.754	0.695	0.622	0.590	0.634	0.739
								1.000

工业区解释的总方差

因子	特征值	方差的百分率(%)	累积贡献率(%)
1	5.254	65.670	65.670
2	1.263	15.786	81.455

工业区的成份得分系数矩阵(因子载荷矩阵)

	CO	NO	SO ₂	NO ₂	O ₃	PM ₁₀	PM _{2.5}	VOC
1	-0.105	0.122	0.218	0.277	0.272	0.028	0.142	0.105
2	0.505	0.145	0.001	-0.154	-0.155	0.343	0.14	0.221

山区的 Pearson 相关矩阵

	CO	NO	SO ₂	NO ₂	O ₃	PM10	PM2.5	VOC
CO	1.000	-0.291	0.113	0.527	0.075	0.078	-0.205	-0.176

相关	NO	-0.291	1.000	0.066	0.090	0.246	0.049	0.766	0.606
	SO2	0.113	0.066	1.000	0.364	-0.006	0.945	0.107	0.627
	NO2	0.527	0.090	0.364	1.000	0.505	0.358	0.122	0.252
	O ₃	0.075	0.246	-0.006	0.505	1.000	-0.045	0.226	0.170
	PM10	0.078	0.049	0.945	0.358	-0.045	1.000	0.028	0.629
	PM2.5	-0.205	0.766	0.107	0.122	0.226	0.028	1.000	0.590
	VOC	-0.176	0.606	0.627	0.252	.170	0.629	0.590	1.000

山区:

山区解释的总方差

因子	特征值	方差的百分率(%)	累积贡献率(%)
1	3.042	38.022	38.022
2	2.036	25.445	63.467
3	1.549	19.362	82.829

	CO	NO	SO2	NO2	O ₃	PM10	PM2.5	VOC
1	0.022	-0.042	0.404	0.072	-0.138	0.415	-0.039	0.24
2	0.202	-0.39	0.046	0.004	-0.166	0.063	-0.376	-0.24
3	0.395	0.006	-0.01	0.489	0.425	-0.032	0.033	-0.03

山区的成份得分系数矩阵(因子载荷矩阵)

交通区:

交通区的 Pearson 相关矩阵									
	CO	NO	SO2	NO2	O ₃	PM10	PM2.5	VOC	
相 关	CO	1.000	-0.012	0.540	0.263	0.384	0.699	0.059	0.149
	NO	-0.012	1.000	0.355	0.636	0.457	0.168	0.752	0.726
	SO2	0.540	0.355	1.000	0.574	0.473	0.689	0.457	0.507
	NO2	0.263	0.636	0.574	1.000	0.628	0.406	0.793	0.840
	O ₃	0.384	0.457	0.473	0.628	1.000	0.444	0.585	0.636
	PM10	0.699	0.168	0.689	0.406	0.444	1.000	0.242	0.387
	PM2.5	0.059	0.752	0.457	0.793	0.585	0.242	1.000	0.873
	VOC	0.149	0.726	0.507	0.840	0.636	0.387	0.873	1.000

交通区解释的总方差

因子	特征值	方差的百分率(%)	累积贡献率(%)
1	4.550	56.873	56.873
2	1.758	21.977	78.850

交通区的成份得分系数矩阵(因子载荷矩阵)

	CO	NO	SO2	NO2	O ₃	PM10	PM2.5	VOC
成份	1	-0.076	0.246	0.066	0.217	0.146	-0.012	0.259
	2	0.41	-0.107	0.284	0.051	0.134	0.378	-0.065

农田区:

农田区的 Pearson 相关矩阵								
	CO	NO	SO2	NO2	O ₃	PM10	PM2.5	VOC
CO	1.000	0.358	0.689	0.107	0.176	0.691	0.265	0.285
NO	0.358	1.000	0.564	0.500	0.054	0.433	0.598	0.712
SO2	0.689	0.564	1.000	0.357	0.023	0.739	0.397	0.509
NO2	0.107	0.500	0.357	1.000	0.136	0.267	0.756	0.521
O ₃	0.176	0.054	0.023	0.136	1.000	-0.048	0.389	0.063
PM10	0.691	0.433	0.739	0.267	-0.048	1.000	0.168	0.298
PM2.5	0.265	0.598	0.397	0.756	0.389	0.168	1.000	0.748
VOC	0.285	0.712	0.509	0.521	0.063	0.298	0.748	1.000

农田区解释的总方差

因子	特征值	方差的百分率(%)	累积贡献率(%)
1	3.907	48.840	48.840
2	1.615	20.182	69.023
3	1.056	13.202	82.225

农田区的成份得分系数矩阵(因子载荷矩阵)

	CO	NO	SO2	NO2	O ₃	PM10	PM2.5	VOC
1	-0.075	0.252	0.066	0.304	-0.016	-0.023	0.307	0.3
2	-0.396	-0.084	-0.325	0.072	-0.015	-0.378	0.054	-0.007
3	0.19	-0.154	-0.078	-0.004	0.862	-0.115	0.234	-0.12

附录 4

CO 治理各个污染源控制比例 3 种方案对比

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m ³)	降低比例
CO	4742	7293	2	0.0177	36.18%
	12696	3024	4	0.0754	27.48%
	18134	10046	4	0.0662	36.33%
污染物排放总量(亿 m ³)		8.2108		污染指数 PLI	1.0599
GDP(亿元)		210.067		单位 GDP 排放量(亿 m ³ /亿元)	0.039086
目标函数值			1.099		

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m ³)	降低比例
CO	4742	7293	2	0.0166	40.38%
	12696	3024	4	0.0662	36.28%

	18134	10046	4	0.0797	23.32%
污染物排放总量(亿 m3)		8.2134		污染指数 PLI	1.0987
GDP(亿元)		210.2537		单位 GDP 排放量(亿 m3/亿元)	0.039064
目标函数值			1.0992		

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m3)	降低比例
CO	4742	7293	2	0.0229	17.58%
	12696	3024	4	0.0665	36.03%
	18134	10046	4	0.0557	46.38%
污染物排放总量(亿 m3)		8.1991		污染指数 PLI	1.0605
GDP(亿元)		209.2395		单位 GDP 排放量(亿 m3/亿元)	0.039185
目标函数值			1.0997		

NO 治理各个污染源控制比例 3 种方案对比

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m3)	降低比例
NO	1647	2728	2	0.1371	32.83%
	2708	2295	4	0.6041	32.01%
	3299	6018	4	0.5887	33.75%
	21439	11383	4	0.8762	1.41%
污染物排放总量(亿 m3)		7.7705		污染指数 PLI	2.6658
GDP(亿元)		177.2234		单位 GDP 排放量(亿 m3/亿元)	0.043846
目标函数值			2.7097		

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m3)	降低比例
NO	1647	2728	2	0.1240	39.27%
	2708	2295	4	0.8665	2.49%
	3299	6018	4	0.5935	33.21%
	21439	11383	4	0.6662	25.03%
污染物排放总量(亿 m3)		7.8109		污染指数 PLI	2.6844
GDP(亿元)		180.3437		单位 GDP 排放量(亿 m3/亿元)	0.043311
目标函数值			2.7277		

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m3)	降低比例
NO	1647	2728	2	0.1516	25.72%
	2708	2295	4	0.8380	5.69%
	3299	6018	4	0.4885	45.03%
	21439	11383	4	0.6792	23.56%
污染物排放总量(亿 m3)		7.7258		污染指数 PLI	2.6862
GDP(亿元)		173.752		单位 GDP 排放量(亿 m3/亿元)	0.04447

目标函数值	2.7307
-------	--------

SO₂治理各个污染源控制比例3种方案对比

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m ³)	降低比例
SO ₂	2383	3692	2	0.1647	27.32%
	10685	5528	4	0.9928	15.19%
	4592	4603	1	0.2014	39.71%
	3299	6018	4	0.9626	17.77%
污染物排放总量(亿 m ³)	7.912			污染指数 PLI	1.6107
GDP(亿元)	188.0818			单位 GDP 排放量(亿 m ³ /亿元)	0.04207
目标函数值					1.6528

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m ³)	降低比例
SO ₂	2383	3692	2	0.1497	33.94%
	10685	5528	4	0.9117	22.13%
	4592	4603	1	0.2369	29.07%
	3299	6018	4	0.9967	14.86%
污染物排放总量(亿 m ³)	7.8857			污染指数 PLI	1.6106
GDP(亿元)	186.0824			单位 GDP 排放量(亿 m ³ /亿元)	0.042377
目标函数值					1.653

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m ³)	降低比例
SO ₂	2383	3692	2	0.2241	1.098%
	10685	5528	4	0.7531	35.67%
	4592	4603	1	0.2330	30.26%
	3299	6018	4	0.7846	32.98%
污染物排放总量(亿 m ³)	7.6359			污染指数 PLI	1.6118
GDP(亿元)	166.7169			单位 GDP 排放量(亿 m ³ /亿元)	0.045802
目标函数值					1.6576

NO₂治理各个污染源控制比例3种方案对比

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m ³)	降低比例
NO ₂	3299	6018	4	0.2563	17.92%
	2383	3692	2	0.0241	82.08%
污染物排放总量(亿 m ³)	8.1693			污染指数 PLI	0.01298
GDP(亿元)	207.11			单位 GDP 排放量(亿 m ³ /亿元)	0.03944
目标函数值					0.05242

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m ³)	降低比例
NO ₂	3299	6018	4	0.2102	32.68%

	2383	3692	2	0.044	67.32%
污染物排放总量(亿 m3)		8.1433		污染指数 PLI	0.01298
GDP(亿元)		205.239		单位 GDP 排放量(亿 m3/亿元)	0.039677
目标函数值			0.052655		

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m3)	降低比例
NO2	3299	6018	4	0.1652	47.11%
	2383	3692	2	0.0634	52.89%
污染物排放总量(亿 m3)		8.1179		污染指数 PLI	0.01298
	GDP(亿元)	203.399		单位 GDP 排放量(亿 m3/亿元)	0.0399
目标函数值			0.052889		

O₃ 治理各个污染源控制比例 3 种方案对比

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m3)	降低比例
O ₃	15248	9106	4	0.0253	25.54%
	13694	2357	4	0.0242	28.79%
	2708	2295	4	0.0185	45.66%
污染物排放总量(亿 m3)		8.2284		污染指数 PLI	0.021486
	GDP(亿元)	211.312		单位 GDP 排放量(亿 m3/亿元)	0.038936
目标函数值			0.060426		

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m3)	降低比例
O ₃	15248	9106	4	0.0221	35.01%
	13694	2357	4	0.0188	44.84%
	2708	2295	4	0.0271	20.15%
污染物排放总量(亿 m3)		8.2284		污染指数 PLI	0.021576
	GDP(亿元)	211.3124		单位 GDP 排放量(亿 m3/亿元)	0.0389
目标函数值			0.060516		

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m3)	降低比例
O ₃	15248	9106	4	0.0245	28.01%
	13694	2357	4	0.0189	44.43%
	2708	2295	4	0.0246	27.56%
污染物排放总量(亿 m3)		8.2284		污染指数 PLI	0.02154
	GDP(亿元)	211.3124		单位 GDP 排放量(亿 m3/亿元)	0.038939
目标函数值			0.060479		

PM₁₀ 治理各个污染源控制比例 3 种方案对比

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m3)	降低比例
-------	---	---	----	-------------	------

PM10	22193	12185	3	0.1127	8.398%
	3299	6018	4	0.0339	91.61%
污染物排放总量(亿 m3)		7.9977		污染指数 PLI	1.4153
GDP(亿元)		194.54		单位 GDP 排放量(亿 m3/亿元)	0.0411
目标函数值			1.4564		

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m3)	降低比例
PM10	22193	12185	3	0.0843	31.53%
	3299	6018	4	0.1273	68.47%
污染物排放总量(亿 m3)		8.05		污染指数 PLI	1.4194
GDP(亿元)		198.64		单位 GDP 排放量(亿 m3/亿元)	0.04054
目标函数值			1.46		

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m3)	降低比例
PM10	22193	12185	3	0.0692	43.79%
	3299	6018	4	0.1768	56.21%
污染物排放总量(亿 m3)		8.0822		污染指数 PLI	1.4217
GDP(亿元)		200.79		单位 GDP 排放量(亿 m3/亿元)	0.04025
目标函数值			1.4619		

PM_{2.5} 治理各个污染源控制比例 3 种方案对比

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m3)	降低比例
PM2.5	4777	4897	1	0.3015	43.91%
	2383	3692	2	0.2786	56.09%
污染物排放总量(亿 m3)		8.0544		污染指数 PLI	1.1401
GDP(亿元)		198.75		单位 GDP 排放量(亿 m3/亿元)	0.040525
目标函数值			1.1806		

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m3)	降低比例
PM2.5	4777	4897	1	0.5087	5.38%
	2383	3692	2	0.0341	94.62%
污染物排放总量(亿 m3)		8.0369		污染指数 PLI	1.1429
GDP(亿元)		197.4577		单位 GDP 排放量(亿 m3/亿元)	0.0407
目标函数值			1.1836		

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m3)	降低比例
PM2.5	4777	4897	1	0.345	35.83%
	2383	3692	2	0.2273	64.17%
污染物排放总量(亿 m3)		8.0507		污染指数 PLI	1.1407

GDP(亿元)	198.479	单位 GDP 排放量(亿 m3/亿元)	0.04056
目标函数值			1.1813

VOC 治理各个污染源控制比例 3 种方案对比

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m3)	降低比例
VOC	2383	3692	2	0.2408e-3	9.34 %
	12696	3024	4	0.9034e-3	18.13%
	3299	6018	4	0.9677e-3	12.31%
	9328	4311	1	0.2313e-3	10.50%
	13797	9621	4	0.9182e-3	16.79%
	2383	3692	2	0.1781e-3	32.95%
污染物排放总量(亿 m3)		8.2595		污染指数 PLI	0.04902
GDP(亿元)		211.49		单位 GDP 排放量(亿 m3/亿元)	0.038687
目标函数值					0.087705

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m3)	降低比例
VOC	2383	3692	2	0.0003	0.7793 %
	12696	3024	4	0.0010	9.93%
	3299	6018	4	0.0010	13.02%
	9328	4311	1	0.0002	17.29%
	13797	9621	4	0.0010	6.39%
	2383	3692	2	0.0001	52.57%
污染物排放总量(亿 m3)		8.2597		污染指数 PLI	0.04909
GDP(亿元)		211.506		单位 GDP 排放量(亿 m3/亿元)	0.038686
目标函数值					0.087777

污染物类型	x	y	区域	年度排放量(亿 m3)	降低比例
VOC	2383	3692	2	0.0002	8.94%
	12696	3024	4	0.0010	12.07%
	3299	6018	4	0.0008	24.55%
	9328	4311	1	0.0002	19.37%
	13797	9621	4	0.0010	9.08%
	2383	3692	2	0.0002	25.97%
污染物排放总量(亿 m3)		8.2596		污染指数 PLI	0.04906
GDP(亿元)		211.497		单位 GDP 排放量(亿 m3/亿元)	0.038687
目标函数值					0.087745

致谢

环境问题的日益严重，这也引起人们越来越多的重视，所以本文就以研究环境问题为主题，系统的研究了有关大气污染治理的问题。

本课题现已完成，回首做课题的这一段时间，我们也学到了很多的东西。本课题能够顺利完成，是指导老师和队员的共同努力的结果。在此我要特别感谢我的指导老师闫超老师，每每在我们遇到问题的时候，通过细致入微的讲解让我们能够清楚认识遇到的难题，而后通过大家的努力，一起攻克。同时还有我同组的队员也做了很多的工作。感谢曹政同学的文献整理工作，让我们能够清楚了解到我们正在研究的问题已经取得了什么样的成果，达到什么样的效果，以及最后进行论文的润色工作。感谢贺芃皓同学的数据整理工作，正是因为他的贡献才能够让我们的论文在数据表现这一块内容详实、准确。感谢朱逸飞同学的论文撰写工作，逻辑思维严谨，论据充分，能够将我们每个人所做的工作融入到一篇论文之中。

本参赛团队声明所提交的论文是在指导老师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。尽本团队所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。若有不实之处，本人愿意承担一切相关责任。

贺九皓 朱逸飞

参赛队员：

凌一

指导老师：

2019年9月8日