DOI:10.13205/j.hjgc.202204029
崔建升,桑敏捷,伯鑫,等. 基于整数规划算法的大气排放源优化方案快速效果评估[J]. 环境工程,2022,40(4):202-208.

基于整数规划算法的大气排放源优化方案快速效果评估

崔建升[1] 桑敏捷[1] 伯 鑫[2,3*] 王 鹏[4] 薛晓达[5] 郭 静[5] 雷团团[6] 屈加豹[6]
王成鑫[7] 路瑞娟[8] 李时蓓[6] 任丽红[9]

(1.河北科技大学 环境科学与工程学院,石家庄 050018; 2.北京化工大学 环境科学与工程系,北京 100029;
3.北京化工大学 北化中国工业碳中和研究院,北京 100029; 4.中科三清科技有限公司,北京 100020;
5.北京航空航天大学 经济管理学院,北京 100191; 6.生态环境部 环境工程评估中心,北京 100012; 7.四川大学 建筑与环境学院,成都 610065; 8.沧州市生态环境保护科学研究院,河北 沧州 061000; 9.中国环境科学研究院,北京 100012)

摘要:基于空气质量模型模拟结果,利用 0~1 整数规划算法,建立了排放量与污染物环境浓度的多情景快速反应决策模型,实现了大气污染管控目标下大气污染物排放源调整方案的快速决策。以大气环境考核重点关注区域河北省沧州市高速合围区为例,采用 AERMOD 模拟分析了各排放源一次 PM_{10} 对国控点贡献排名情况,利用 0~1 整数规划模型求解了在贡献浓度调整下各排放源组的最优控制方案。结果表明:沧州市高速合围区内颗粒物排放源对国控点的污染浓度贡献中,道路源排放占比最高,其次为非道路移动源;此外,在实现合围区内排放总量调整最小且对国控点(市环保局、沧县城建局、电视转播站站点)贡献浓度均降低至少 1.5 μg/m^3 的目标下,对"新华区省道""运河区土壤扬尘"源组的管控方案达到最优,源组总排放量为 791.30 t/a,下降幅度为 15.66 t/a,对各国控点年均贡献浓度为 7.80,10.09,7.87 μg/m^3,分别下降了 1.75,2.00,1.52 μg/m^3。该方法可实现在既定的大气污染源调整方案下的快速效果评估,并提供最优减排方案。

关键词:大气污染控制;辅助决策工具;0~1 整数规划;源贡献分析

STUDIES ON CONTRIBUTION DECISION FOR FAST SIMULATION OF AIR POLLUTION SOURCES OPTMIZATION BASED ON INTEGER PROGRAMMING ALGORITHM

CUI Jiansheng[1], SANG Minjie[1], BO Xin[2,3*], WANG Peng[4], XUE Xiaoda[5], GUO Jing[5], LEI Tuantuan[6], QU Jiabao[6], WANG Chengxin[7], LU Ruijuan[8], LI Shibei[6], REN Lihong[9]

(1. School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China;
2. Department of Environmental Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;
3. BUCT Institute for Carbon-neutrality of Chinese Industries, Beijing 100029, China; 4. 3Clear Technology Co., Ltd, Beijing 100020, China; 5. School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China;
6. Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China;
7. School of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
8. Environmental Protection Science Research Institute of Cangzhou City, Cangzhou 061000, China;
9. Chinese Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

收稿日期:2021-07-30
基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFE0194500);欧盟地平线 2020 项目(870301);国家自然科学基金项目(72174125);中央高校基本科研业务费(buctrc202133);大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0209-07,DQGG0304-07)
第一作者:崔建升(1966-),男,博士,教授,主要从事环境监测技术研究。cui1603@163.com
*通信作者:伯鑫,教授。boxin@buct.edu.cn

中国知网 https://www.cnki.net

Abstract: Based on the results of the air quality model and the 0~1 integer programming algorithm, the multi-scenario rapid response decision model of emission factors and pollutants' environmental concentration was established, which realized the rapid decision of the adjustment plan of air pollutant emission sources under the air pollution control target. The model was applied to the high-speed enclosed area of Cangzhou, Hebei. Based on the AERMOD simulation results of atmospheric primary PM_{10} in 2018, the contribution of each emission source to the national controlled point pollution in the enclosed area was analyzed, and the optimal source group control solution was obtained when the total contribution concentration value was adjusted. The results showed that among the particulate matter emission sources in Cangzhou expressway enclosed area, the contribution of road sources to national controlled points pollution was the highest, followed by non-road mobile sources. In addition, it was optimal to control the source groups of *provincial road in Xinhua Distric* and *soil dust in Yunhe District* under the goal of minimizing the total emission in the confined area and reducing the contribution concentration of national control points (Municipal Environmental Protection Bureau Station, Cangxian Urban Construction Bureau Station and TV Transmission Station) by at least 1.5 $\mu g/m^3$, the total emission of source groups was 791.30 t/a, with a decrease of 15.66 t/a; the average annual contribution concentration of each control point was 7.80 $\mu g/m^3$, 10.09 $\mu g/m^3$ and 7.87 $\mu g/m^3$, decreased by 1.75 $\mu g/m^3$, 2.00 $\mu g/m^3$ and 1.52 $\mu g/m^3$, respectively. This research method realized the rapid effect evaluation under the given air pollution source adjustment plan, and gave the optimal emission reduction plan.

Keywords: air pollution control; decision support tool; 0~1 integer programming; source contribution analysis

0　引　言

空气质量模型在大气环境研究工作中,主要用于环境规划[1]、环境影响评价[2,3]、环境监测与预报预警[4]、环境质量变化趋势[5-8]、环境功能区划[9]、环境应急预案[10,11]、来源解析[12,13]等有关政策制定和文件编制中。目前已有学者开展了空气质量模型辅助决策研究,如劳苑雯等[14]开发了区域大气污染控制可视化辅助决策工具;邢佳等[15]建立了大气污染防治综合科学决策支持平台,反算了京津冀及周边地区"2+26"城市在 2035 年达标要求下的减排情景,进而评估了减排方案的费用与效益。但上述研究均采用区域空气质量模型(CMAQ 等),多集中在行业或城市维度上分析,且研究较为宏观、整体,缺乏精细化的个体研究,如具体到单个企业、单条道路等小类源组,难以给出适用于不同个体详细具体的优化决策方案。

一般来讲,空气质量模型在实际环境管理决策应用上存在以下局限:1)决策情境越多,运算时间越长;2)清单所包含源组数量多,只能基于火电、生活等大类源分析,较少能精确到企业、道路等小类源组,无法给出详细具体的优化决策;3)仅可由专业人员操作,地方管理者无法快速使用,进行决策。此外,已有区域环境规划研究中采用的数学方法主要包括线性优化法[16]、遗传算法[17,18]、A-P 值法[19]等分析方法,多是从区域排放总量整体、宏观角度调整分析[20-23]。

针对上述局限,本研究基于 0~1 整数规划算法,结合空气质量模型模拟结果,构建了多情景快速反应决策模型,实现仅运行 1 次空气质量模型,管理者即可获得不同环境管理情景下不同排放源的减排决策方案,适用于重污染天气应对、突发事件应急反应机制等实际问题,通过完全关停排放源,快速得出源组调整方案。本研究以 2018 年沧州市高速合围区为研究对象,分析了现状排放情景、优化排放情景下企业及主干道路的减排优化决策方案,从而达到快速效果评估的目的。

1　材料与方法

1.1　整数规划算法

整数规划是在线性规划的基础上,全部或部分决策变量为整数的最优化问题求解方法,是运筹学和管理科学基本模型之一[24]。0~1 整数规划是决策变量仅限于 0 或 1 来建立数学模型的一种特殊情形,可定量化地描述离散变量间如开与关、取与弃、是与非等逻辑关系及约束条件,具有原理简单、计算量小且结果精确等优点[25],已广泛应用于选址布局、调度规划、路径设计、背包问题等领域[26]。本研究基于各污染物排放源组的排放量和污染贡献浓度数据,运用 0~1 整数规划算法,建立多目标约束下,排放源组开关控制的多情景快速反应决策模型。此模型不涉及空气质量模型复杂模拟设置过程,因此适用于任何一种空气质量模型;仅需模拟 1 次所得的各源组贡献浓度数据,即可对任一环境管理情景进行快速源组排放调整决策。

中国知网　https://www.cnki.net

本研究使用0~1整数规划算法进行各污染排放源组调整决策研究,约束条件及目标函数见式(1)—(3):

$$\max z = \sum_i a_i x_i \tag{1}$$

$$x_i = \begin{cases} 0, & \text{第 } i \text{ 个源组关闭,} \\ 1, & \text{第 } i \text{ 个源组开启,} \end{cases} \quad i = 1,2,\cdots,n \tag{2}$$

$$st. \begin{cases} \sum_i b_{i1} x_i \leqslant c_1 \\ \sum_i b_{i2} x_i \leqslant c_2 \\ \sum_i b_{i3} x_i \leqslant c_3 \\ x_i = 0 \text{ 或 } 1 \end{cases} \tag{3}$$

式中:a_i 为源组 $i(i = 1,2,\cdots,n)$ 的基准年一次 PM_{10} 排放量,t;b_{ij} 为源组 $i(i = 1,2,\cdots,n)$ 对国控点 $j(j = 1,2,\cdots,m)$ 的贡献浓度,μg/m³;x_i 为决策变量,取值为0或1;c_j 为国控点 j 贡献浓度,μg/m³。在年排放总量 z 最大的目标条件下,求得对每个国控点的总贡献浓度下降幅度≥1.5 μg/m³ 时的源组调整最优解。

1.2 实验设计

建立多情景快速反应决策模型的难点在于确立源组间排放量-贡献浓度的定量关系。图1为模型构建及应用的研究流程。

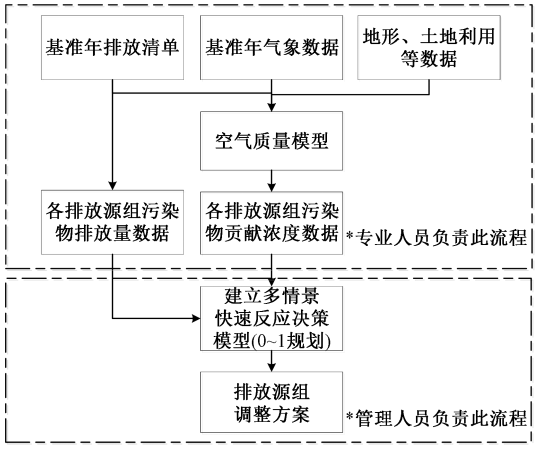


图1 模型研究流程

Figure 1 Research process of fast response decision making model

决策模型中0、1变量的选取(污染物源组的排放控制系数)是污染贡献矩阵设计的关键部分。当控制因子为1时,代表此源组正常排放,不作控制;为0时,代表关闭此排放源组。对应 n 个排放源组,1个国控点对应的控制情景组合有 2^n 种。模型输入数据见表1。

表1 模型输入数据汇总

Table 1 Summary of model input data

数据类型	数据内容
空气质量模型输出数据	模型模拟目标地区目标年空气质量,经过数据处理后,得到各源组对各受体(如国控点、网格点)年均贡献浓度数据
排放因子信息文件	包含污染物、排放源组、控制因子选取等信息
目标区域信息文件	包括环境管理达标浓度、目标点坐标信息、目标范围边界坐标等信息

2 应用案例

2.1 研究区域与对象

沧州市高速合围区位于沧州市主城区,主要由运河区部分区域、新华区、沧县部分区域、青县部分区域组成(图2),拥有全市90%以上的市直机关和高等院校、多家省部级化工龙头企业,为沧州市政治、经济、文化中心,是大运河文化带建设及大气环境考核的地方重点关注区域[27]。近年来,合围区内大气污染治理不断向好,但部分领域排放情况仍有待改善[28]。为了摸清沧州市污染源排放水平,优化各排放源组减排决策方案,实现整体排放与经济的动态平衡,本研究利用0~1整数规划算法,以一次 PM_{10} 排放量控制及对国控点年均贡献浓度达标为约束条件,从空气质量管理需求出发,开展沧州市高速合围区内各排放源组年均贡献分析,得到排放源组调整的优选方案。

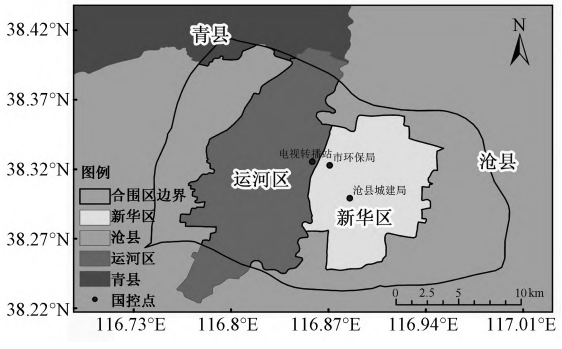


图2 研究区域示意

Figure 2 Diagram of research area

2.2 空气质量模型选型与配置

本研究选择 AERMOD(AMS/EPA Regulatory Model)模型模拟2018年沧州市高速合围区内颗粒物排放源对沧州市国控空气质量监测站点[沧州市环保局(38.32°N,116.87°E)、沧县城建局(38.30°N,116.89°E)、电视转播站(38.33°N,116.86°E)]的 PM_{10} 浓度贡献。AERMOD是1个稳态烟羽扩散模式,为HJ 2.2—2018《环境影响评价技术导则 大气环境》[29]中推荐的空气质量法规模型,适用于局地尺度

中国知网 https://www.cnki.net

的环境空气质量模拟,可用于农村或城市地区、简单或复杂地形,目前已在企业、道路等街区尺度的空气质量模拟领域中得到广泛应用[29-32]。地面气象数据使用沧州市 2018 年全年地面气象站数据[33];选择中尺度气象模式 WRFv3.9(the weather research and forecasting model)模拟三维高空气象场[34,35],并通过 MMIF 转换程序(mesoscale model interface program)转换 WRF 模式的输出结果,本次 WRF 模式初始场采用美国环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction)的全球再分析资料[36],水平分辨率为 1°×1°,每天共 4 个时次(00:00,06:00,12:00,18:00),收集的探空观测数据包括大气压、高度、干球温度、露点温度、风向、风速等;地形资料选自美国地质勘探局(United States Geological Survey)精度 90 m 数据[37];地表参数数据精度为 30 m[38];有关参数如表 2 所示。

表 2　模型输入参数

Table 2　Model input parameters

研究范围	地面气象观测资料					高空气象探测资料	
沧州市高速合围区/km	气象站编号	站点经纬度	站点海拔高度/m	测风高度/m	数据时间	网格点经纬度	数据时间
25×23	54616	38.35°N,116.85°E	10.8	10	2018-01-01—12-31	38.34°N,116.86°E	2018-01-01—12-31

本研究的模拟输入清单来源于本团队编制的 2018 年沧州市大气污染物排放清单[39]。高速合围区内污染源包括工业源(140 家企业)、堆场扬尘、土壤扬尘、道路源、非道路移动源、生活源;各类源一次 PM_{10} 排放量如表 3 所示,共计 806.96 t/a;其中源类型包括点源、线源、面源,共计 177 个排放源;在运行模型时,同时输入所有排放源排放参数,在设置中将每个排放源都分别划分成 1 个源组,模型运行结束后可输出各源组对受体点贡献情况的结果文件,实现仅运行 1 次空气质量模型,即可得到每个排放源贡献情况的结果。本次模拟中道路源主要包括合围区内主干道(高速、国道、省道及县道)的道路扬尘及机动车排放,生活源主要包括民用锅炉、民用燃烧及生物质炉灶排放。

表 3　研究区域内 PM_{10} 排放量

Table 3　PM_{10} emissions in the research area　t/a

输入模型种类	清单排放源种类	新华区	运河区	沧县	青县	总量
工业点源	工业源	225.01	149.59	23.58	0.02	398.20
堆场扬尘面源	堆场扬尘	14.38	0.00	0.28	0.00	14.66
土壤扬尘面源	土壤扬尘	1.53	2.44	4.30	0.35	8.62
道路线源	道路扬尘	48.34	22.47	74.82	1.81	147.44
	道路移动源	1.37	1.66	3.18	0.06	6.26
非道路移动面源	非道路移动源	17.44	31.59	9.23	0.23	58.48
生活面源	民用锅炉	0.04	0.00	0.00	0.00	0.04
	民用燃烧	0.00	0.00	166.66	3.41	170.07
	生物质炉灶	0.00	2.95	0.22	0.03	3.20
总量	—	308.11	210.70	282.27	5.90	806.96

2.3　0~1 整数规划模型搭建

以实现市环保局、沧县城建局、电视转播站 3 个国控点贡献浓度均下降 1.5 μg/m³ 为例,进行各排放源组贡献浓度调整决策研究。将示例参数代入 1.1 节的算法公式中,a_i 为源组 $i(i=1,2,\cdots,177)$ 的 2018 年排放量;b_{ij} 为源组 $i(i=1,2,\cdots,177)$ 对国控点 $j(j=1,2,3)$ 的贡献浓度;x_i 为决策变量,取值为 0 或 1;c_j 为国控点 j 贡献浓度;使用 LINGO 编程,在年排放总量 z 最大的目标条件下,由式(3)求得对每个国控点的总贡献浓度降低≥1.5 μg/m³ 的源组调整最优解。

2.4　模拟效果校验

本研究使用《大气重污染成因与治理攻关项目——沧州市驻点跟踪研究报告》[40]中 2018—2019 年秋冬季颗粒物的源解析结果,进行本研究结果的模拟效果评估。

3　结果与讨论

3.1　现状情景源组贡献分析

以 3 个国控点为受体,进行区域内一次 PM_{10} 排放的浓度贡献模拟。结果表明:合围区内排放对沧县城建局国控点年均贡献浓度最高,为 12.09 μg/m³;其次是市环保局国控点、电视转播站国控点,贡献浓度分别为 9.54,9.38 μg/m³。从不同类别排放源对国控点贡献情况(图 3)来看,道路源对国控点贡献浓度占比最高(平均值为 71%),其次为非道路移动源(10%)、工业源(9%)。

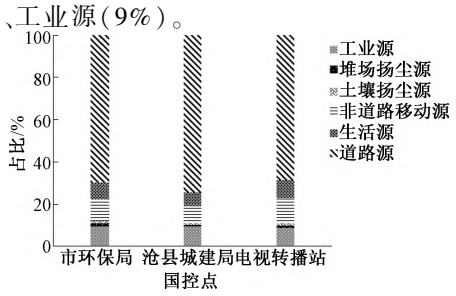


图 3　各类源贡献浓度占比

Figure 3　The contribution proportion of each source's concentration

中国知网　https://www.cnki.net

从不同的排放源组对国控点的贡献分析来看,由于篇幅原因,文中仅列举了排名前 20 的源组贡献(表 4)。

表 4 国控点排放源组贡献排名

Table 4 Ranking of contribution of emission source groups at the national controlled points

排序	市环保局国控点		沧县城建局国控点		电视转播站国控点	
	源组	年均浓度/($\mu g/m^3$)	源组	年均浓度/($\mu g/m^3$)	源组	年均浓度/($\mu g/m^3$)
1	新华区省道	1.72	新华区国道	3.21	新华区省道	1.45
2	运河区省道	1.53	新华区省道	1.98	运河区省道	1.33
3	新华区县道	0.77	运河区省道	1.25	新华区县道	1.26
4	新华区国道	0.77	沧县生活源	0.75	运河区非道路移动源	0.88
5	沧县生活源	0.73	新华区非道路移动源	0.74	沧县生活源	0.72
6	沧县高速	0.65	沧县高速	0.69	沧县高速	0.65
7	新华区非道路移动源	0.64	沧县省道	0.55	新华区国道	0.56
8	沧县省道	0.41	新华区县道	0.46	沧县省道	0.40
9	沧县国道	0.41	运河区县道	0.36	沧县国道	0.32
10	运河区非道路移动源	0.31	沧县国道	0.30	运河区县道	0.25
11	运河区县道	0.19	运河区非道路移动源	0.19	新华区非道路移动源	0.22
12	A 公司	0.14	G 公司	0.17	A 公司	0.12
13	B 公司堆场扬尘源	0.11	H 公司	0.16	C 公司	0.09
14	运河区国道	0.08	运河区国道	0.11	运河区国道	0.08
15	C 公司	0.07	A 公司	0.10	B 公司堆场扬尘源	0.08
16	D 公司	0.06	I 公司	0.08	D 公司	0.07
17	新华区土壤扬尘源	0.06	新华区土壤扬尘源	0.07	运河区土壤扬尘源	0.07
18	运河区高速	0.06	E 公司	0.06	运河区生活源	0.06
19	E 公司	0.05	D 公司	0.05	运河区高速	0.06
20	F 公司	0.05	F 公司	0.04	E 公司	0.04

由表 4 可知:对市环保局、沧县城建局、电视转播站国控点贡献排名前 3 的源组种类均为道路源,位于新华区和运河区;3 个源组贡献浓度总量分别占各自国控点总浓度的 42%、53%、43%。

通过现状情景的源组贡献分析可知,2018 年沧州市高速合围区内 PM_{10} 排放对沧县城建局国控点贡献最大;在各类源中,道路源贡献最高。因此,对道路排放源采取相应管控措施,可有效降低合围区内排放对本地的污染贡献。

3.2 现状情景模拟效果校验

本研究模拟所得合围区内各类排放源贡献浓度在国控点实测年均值中占比见表 5。其中,工业源对国控点贡献占比为 0.91%,扬尘源(包含堆场扬尘、土壤扬尘及道路扬尘)和机动车占比共 7.31%,民用燃煤源占比为 0.76%;根据沧州市源解析结果(合围区内各类排放源贡献浓度占国控点实测年均值比例情况),工业源对国控点贡献占比为 0.73%,扬尘源及机动车占比共 4.71%,民用燃煤源占比为 0.55%,2 组数据均方根误差(RMSE)为 0.015,趋近于 0,表明模拟效果较好。对比发现,本研究模拟结果与源解析结果趋势相同,均为扬尘源及机动车占比最大,工业源占比其次,民用燃煤源占比最低。本研究涵盖的 2018 年合围区内 PM_{10} 排放量对全沧州市 PM_{10} 排放量占比约为 0.55%,与贡献浓度占比量级相符。综上,本研究模拟结果具有可靠性。

表 5 各国控点模拟结果在实测年均值中占比

Table 5 The proportion of simulation results of each national controlled points to the measured annual mean values %

国控点名称	工业源	堆场扬尘	土壤扬尘	非道路移动源	生活源	道路源
市环保局	0.87	0.13	0.09	0.95	0.75	6.41
沧县城建局	1.09	0.10	0.09	0.93	0.75	8.70
电视转播站	0.78	0.10	0.10	1.09	0.77	6.21
平均值	0.91	0.11	0.09	0.99	0.76	7.11

3.3 优化情景源组调整分析

本案例 177 个源组中有点源 140 个、面源 25 个、线源 12 个,源组总排放量为 806.96 t,对目标国控点(市环保局、沧县城建局、电视转播站)年均总贡献浓度分别为 9.54,12.09,9.38 $\mu g/m^3$。使用 0~1 整数规划模型,求得在对 3 个国控点贡献浓度降低 ≥1.5 $\mu g/m^3$ 约束条件下,计算达到总排放量变化最少目标下的最优解。

结果表明:最优方案为对“新华区省道”“运河区土壤扬尘”排放源组进行控制,其余源组均正常排

中国知网 https://www.cnki.net

放。现状排放情景下,各大源类对各国控点贡献占比最大的均为道路源,以贡献浓度最高的沧县城建局国控点为例,道路源各源组对其贡献情况见图 4。可知:在实施对“新华区省道”“运河区土壤扬尘”排放源组管控后,排放总量降低 15.66 t,而对各国控点贡献浓度分别降低了 1.75,2.00,1.52 μg/m^3。调整后的总排放量为 791.30 t,对各国控点年均总贡献浓度可调整至 7.80,10.09,7.87 μg/m^3。

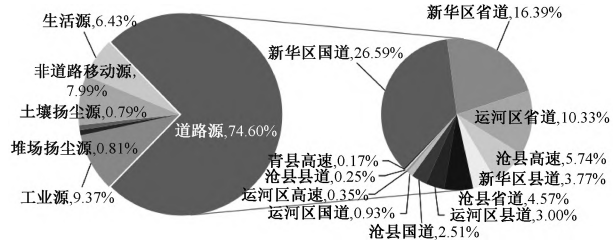


图 4　道路源各源组对沧县城建局贡献占比

Figure 4　Contribution ratio to concentration of Cangxian Urban Construction Bureau of each source group in road source group

3.4　不确定性分析

本研究的不确定性主要来源于以下方面:1)仅选取了沧州市高速合围区内部分 PM_{10} 排放源进行贡献影响模拟,未考虑 PM_{10} 长距离传输影响及模拟区域外高架源排放的影响;2)由于乡村镇道路位置及面积的不确定性较大,本研究中的道路源只考虑了合围区内主干道的排放量进行模拟;3)未考虑时空变化性大的施工扬尘源、餐饮源排放影响;4)本研究所使用的 0~1 整数规划方法,变量仅限于 0 或 1,无法得到变量为分数或小数的部分减排效果最优解,实际应用中具有一定局限性,在未来研究中将进一步使用线性规划等方法对减排率进行研究,并根据各源组的减排潜力,增加相应的约束条件,以增加研究的可行性。

4　结　论

1)现状情景下,合围区排放源对沧县城建局国控点年均总贡献浓度最高(12.09 μg/m^3);排放源组类别中,道路源对国控点浓度贡献占比最高(71%),其次为非道路移动源(10%);对市环保局、沧县城建局、电视转播站国控点贡献排名前 3 的源组种类均为道路源,所在区域均为新华区和运河区。

2)优化情景下,对“新华区省道”“运河区土壤扬尘”源组进行调整为最优解。此时排放量变化最少,而对市环保局、沧县城建局、电视转播站国控点贡献浓度最多可分别降低 1.75,2.00,1.52 μg/m^3。调整后的源组总排放量最低下降至 791.30 t/a,对各国控点年均贡献浓度最低将达到 7.80,10.09,7.87 μg/m^3。

参考文献

[1] 刘潘炜,郑君瑜,李志成, 等. 区域空气质量监测网络优化布点方法研究[J]. 中国环境科学, 2010,30(7):907-913.

[2] 但扬彬,胡恭任,卞雅慧, 等. 漳州大气 $PM_{2.5}$ 污染特征与区域传输影响分析[J]. 地球与环境,2021,49(2):134-146.

[3] 薛亦峰,周震,黄玉虎, 等. 北京市建筑施工扬尘排放特征[J]. 环境科学, 2017, 38(6):2231-2237.

[4] 刘潘炜,郑君瑜,李志成, 等. 区域空气质量监测网络优化布点方法研究[J]. 中国环境科学, 2010,30(7):907-913.

[5] 张楚莹,王书肖,赵瑜, 等. 中国人为源颗粒物排放现状与趋势分析[J]. 环境科学, 2009, 30(7):1881-1887.

[6] 吴文景,常兴,邢佳, 等. 京津冀地区主要排放源减排对 $PM_{2.5}$ 污染改善贡献评估[J]. 环境科学, 2017, 38(3):867-875.

[7] XING J, ZHANG Y, WANG S X, et al. Modeling study on the air quality impacts from emission reductions and atypical meteorological conditions during the 2008 Beijing Olympics[J]. Atmospheric Environment, 2011,45(10):1786-1798.

[8] 汤铃,薛晓达,伯鑫, 等. 中国钢铁行业大气环境影响[J]. 环境科学, 2020, 41(7):2981-2994.

[9] 刘健,潘良宝. 区域大气环境容量与基础工业布局研究:以镇江为例[J]. 长江流域资源与环境, 1994(4):304-312.

[10] 程念亮,李云婷,张大伟, 等. 2013 年 1 月北京市一次空气重污染成因分析[J]. 环境科学, 2015, 36(4):1154-1163.

[11] FOLEY K M, NAPELENOK S L, JANG C, et al. Two reduced form air quality modeling techniques for rapidly calculating pollutant mitigation potential across many sources, locations and precursor emission types[J]. Atmospheric Environment, 2014, 98: 283-289.

[12] 刘得守,李景,苏筱倩, 等. 基于 CAMx-OSAT 方法的西宁臭氧来源解析[J]. 环境科学学报, 2021,41(2):386-394.

[13] XU H, ZHU Y, WANG L, et al. Source contribution analysis of mercury deposition using an enhanced CALPUFF-Hg in the central Pearl River Delta, China[J]. Environmental Pollution, 2019,250(7):1032-1043.

[14] 劳苑雯,朱云,CAREY J, 等. 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, 2012,32(8):1913-1922.

[15] 邢佳,王书肖,朱云, 等. 大气污染防治综合科学决策支持平台的开发及应用[J]. 环境科学研究, 2019,32(10):1713-1719.

[16] 肖杨,毛显强,马根慧, 等. 基于 ADMS 和线性规划的区域大气环境容量测算[J]. 环境科学研究, 2008,21(3):13-16.

[17] 梁泽,王玥瑶,岳远紊, 等. 耦合遗传算法与 RBF 神经网络的 $PM_{2.5}$ 浓度预测模型[J]. 中国环境科学, 2020,40(2):523-529.

[18] 刘品高,江南,余瑶, 等. 基于遗传算法的大气污染总量控制新方法[J]. 环境污染与防治, 2007,29(3):233-237.

[19] 范绍佳,黄志兴,刘嘉玲. 大气污染物排放总量控制 A-P 值法及其应用[J]. 中国环境科学, 1994,14(6):407-410.

中国知网　https://www.cnki.net

[20] 杨丹丹,王体健,李树, 等. 基于空气质量模型和遗传算法的城市 $PM_{2.5}$ 双目标控制策略优化[J/OL]. 中国环境科学:1-14[2021-09-18]. https://doi. org/10. 19674/j. cnki. issn1000-6923. 20210331. 012.

[21] 杨再东,朱云,陶谨, 等. 基于曲面响应建模的 $PM_{2.5}$ 可控人为源贡献解析[J]. 环境科学学报,2018,38(10):3877-3887.

[22] 方叠,钱跃东,王勤耕, 等. 区域复合型大气污染调控模型研究[J]. 中国环境科学,2013,33(7):1215-1222.

[23] 朱云,王书肖, LIN C J, 等, 大气汞污染模拟研究进展及控制策略优化方法[J]. 环境科学,2011,32(6):1851-1856.

[24] WILLIAMS H P. Logic and Integer Programming[M]. New York: Springer-Verlag, 2009.

[25] 陈传军,于宪荣,王延安, 等. 基于 0~1 整数规划模型的水坝选址问题[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2018, 31(1):1-5.

[26] 张惠珍,魏欣,马良. 求解 0~1 线性整数规划问题的有界单纯形法[J]. 运筹学学报, 2014,18(3):71-78.

[27] 沧州市人民政府. 关于印发《沧州市打赢蓝天保卫战三年行动方案》的通知[EB/OL]. 2018, http://www. hb. cangzhou. gov. cn/zwsx/dqwrfc/607045. shtml.

[28] 沧州市大气污染防治工作领导小组办公室. 关于进一步加强中心城区高速合围区移动污染源管控工作的通知[EB/OL]. 2019, http://www. zjj. cangzhou. gov. cn/aqjd/tzgg/691395. shtml.

[29] 生态环境部. 环境影响评价技术导则 大气环境: HJ 2. 2—2018[S]. 北京:中国环境出版社,2018.

[30] 崔磊,屈加豹,王鹏, 等. 火电企业超低排放改造对沧州市主城区大气环境影响研究[J]. 环境与发展,2020,32(9):16-18,20.

[31] 伯鑫,杨朝旭,马岩, 等. 基于空气质量模型 AERMOD 的城市钢铁厂优化布局研究[C]//中国环境科学学会,2019:5.

[32] 王珮玮,杨道源,吴潇萌, 等. 基于 AERMOD 线源模式的城市路网一次 $PM_{2.5}$ 排放扩散特征研究[J]. 环境科学学报,2018,38(7):2728-2734.

[33] 国家气象信息中心. 中国地面气象站逐小时观测资料[EB/OL]. http://www. nmic. cn/dataService/cdcindex/datacode/A. 0012. 0001/show_value/normal. html.

[34] SKAMAROCK W C, KLEMP J B. A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications[J]. Journal of Computational Physics, 2008, 227(7): 3465-3485.

[35] AFZALI A, RASHID M, AFZALI M, et al. Prediction of air pollutants concentrations from multiple sources using AERMOD coupled with WRF prognostic model[J]. Journal of Cleaner Production, 2017,166:1216-1225.

[36] 美国国家环境预报中心. 全球对流层再分析资料[EB/OL]. https://rda. ucar. edu/datasets/ds083. 2/index. html #! description.

[37] 美国地质勘探局. 全球地形高程数据[EB/OL]. https://srtm. csi. cgiar. org/srtmdata/.

[38] 伯鑫,王刚,田军, 等. AERMOD 模型地表参数标准化集成系统研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(9): 2570-2575.

[39] 雷团团. 沧州市大气污染源排放清单及环境影响研究[D]. 石家庄:河北科技大学,2019.

[40] 生态环境部. 大气重污染成因与治理攻关项目:沧州市驻点跟踪研究报告[R]. 北京: 生态环境部, 2020.

(上接第 158 页)

[21] YI Q Y, JI J H, SHEN B, et al. Singlet oxygen triggered by superoxide radicals in a molybdenum cocatalytic Fenton reaction with enhanced REDOX activity in the environment[J]. Environmental Science and Technology, 2019,53:9725-9733.

[22] LING R, YU L, PHAM T P, SHAO T, et al. The tolerance of a thin-film composite polyamide reverse osmosis membrane to hydrogen peroxide exposure[J]. Journal of Membrane Science, 2017,54:529-536.

[23] WANG Q N, LIU M Y, ZHAO H Y, et al. Efficiently degradation of perfluorooctanoic acid in synergic electrochemical process combining cathodic electro-Fenton and anodic oxidation[J]. Chemical Engineering Journal, 2019,378:510-518.

[24] CHEN M, XU J, DAI R B, et al. Development of a moving-bed electrochemical membrane bioreactor to enhance removal of low-concentration antibiotic from wastewater[J]. Bioresource Technology, 2019, 293: 122022.

[25] WANG Z W, HUANG J, ZHU C W, et al. A bioelectrochemically-assisted membrane bioreactor for simultaneous wastewater treatment and enery production. Chemical Engineering and Technology, 2013, 36 (12): 2044-2050.

[26] LIN H, ZHANG H, WANG X, et al. Electro-Fenton removal of Orange Ⅱ in a divided cell: Reaction mechanism, degradation pathway and toxicity evolution[J]. Separation and Purification Technology, 2014,122(3):533-540.

[27] ZHENG J J, WANG Z W, MA J X, et al. Development of an electrochemical ceramic membrane filtration system for efficient contaminant removal from waters[J]. Environmental Science and Technology, 2018,52:4117-4126.

[28] LIANG P Y, RIVALLIN M, CERNEAUX S, et al. Coupling cathodic electro-Fenton reaction to membrane filtration for AO_7 dye degradation: a successful feasibility study[J]. Journal of Membrane Science, 2016,510:182-190.

[29] WANG C, LIU Y B, ZHOU T. Efficient decomposition of sulfamethoxazole in a novel neutral fered-Fenton like/oxalate system based on effective heterogeneous-homogeneous iron cycle[J]. Chinese Chemical Letters, 2019,30(12):2231-2235.

[30] ISHAK S, MALAKAHMAD A. Optimization of Fenton process for refinery wastewater biodegradeability augmentation[J]. Chemical Engineering Journal, 2013,2:1-8.

中国知网 https://www.cnki.net