

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.9
第41卷 第9期

目次

2020年天津市两次重污染天气污染特征分析.....肖致美,徐虹,蔡子颖,李鹏,刘彬,元洁,郑乃源,唐逊,陈魁,邓小文(3879)

基于高分辨率MARGA分析成都市PM_{2.5}中水溶性离子污染特征.....尹寒梅,陈军辉,冯小琼,姜涛,钱骏,刘政(3889)

宿迁市PM_{2.5}中水溶性无机离子的季节特征和来源分析.....
.....马红璐,赵欣,陆建刚,王辉,许纯领,欧阳琰,朱新胜,殷堂兵,漆丹,陆亚秋,汪玖阳,陆声兴(3899)

鼎湖山大气颗粒物中OC与EC的浓度特征及粒径分布.....李安娜,温天雪,华维,杨员,孟泽,胡波,辛金元(3908)

鞍山市道路扬尘碳组分特征及来源解析.....林孜,姬亚芹,林宇,国纪良,马妍,赵静琦(3918)

西安市冬季PM_{2.5}中WSOC的光谱特性和来源解析.....杨毅,张亚楠,刘焕武,田萍萍,李亚飞,雷颖,王一博(3924)

长三角地区气溶胶光学性质与新粒子生成观测.....
.....杜盈盈,陈军,张家洛,甘桂城,刘瑜存,苏明旭,楼晟荣,周敏,陶士康,乔利平(3932)

连云港市挥发性有机化合物的组分特征及来源解析.....崔金梦,王体健,李秋潼,董立文,黄丛吾,曹云擎(3941)

成都市城区大气VOCs季节污染特征及来源解析.....王成辉,陈军辉,韩丽,徐晨曦,王波,李英杰,刘政,钱骏(3951)

德州市夏季臭氧敏感性特征及减排方案.....严茹莎(3961)

超低改造下中国火电排放清单及分布特征.....屈加豹,王鹏,伯鑫,薛晓达,董广霞,崔磊,康明雄,王彤,汤铃,朱法华,李时蓓(3969)

浙江省人为源氨排放清单建立及分布特征.....赵睿东,于兴娜,侯新红,沈丽(3976)

垃圾焚烧烟气中二噁英控制技术的评估与筛选.....赵思岚,奚鹏飞,郭凤艳,邓双,贾建丽(3985)

兰州市两场典型降水事件稳定同位素特征及其水汽来源.....韩婷婷,张明军,王圣杰,杜勤勤,马转转,郭蓉,曹晏风(3993)

然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素.....张涛,王明国,张智印,刘廷,何锦(4003)

河套灌区地下水化学演变特征及形成机制.....崔佳琪,李仙岳,史海滨,孙亚楠,安海军,邢进平(4011)

石期河流域地下水化学特征及物质来源分析.....李笑,于爽,李亮,郭永丽(4021)

长江中下游湖泊水体氮磷时空变化特征及其影响因素.....季鹏飞,许海,詹旭,朱广伟,邹伟,朱梦圆,康丽娟(4030)

2016~2017年长荡湖流域湖库系统营养盐时空分布机制分析.....李新艳,李恒鹏,姜三元,马培,赖锡军,邓建才,陈东强,耿建伟(4042)

菹草对湖泊水质及浮游植物群落结构的影响.....康丽娟,许海,邹伟,朱广伟,朱梦圆,季鹏飞,陈洁(4053)

金泽水库库区细菌群落构建过程与关键驱动因子分析.....刘明坤,童俊,朱慧峰,白晓慧(4062)

典型氟工业园周边河流沉积物中全(多)氟化合物的分布特征.....孙琳婷,赵祯,唐建辉(4069)

微塑料对河水抗生素抗性基因的影响.....周昕原,王言仔,苏建强,黄福义(4076)

莲花水库水体中抗生素污染特征及生态风险评价.....廖杰,魏晓琴,肖燕琴,李青松,范洪勇,刘学军,庄马展,刘超翔(4081)

拟柱胞藻生长及碱性磷酸酶活性对不同磷浓度和磷形态响应的株系间差异.....叶金梅,赵莉,罗旭,彭亮,雷腊梅(4088)

奶水河湿地植物作用及调水水质响应模拟.....李亚娟,杜彦良,毕二平,王亮,陈翠柏(4095)

浅基质层干植草沟运行效果的现场实验.....张佳炜,李田,张庭秀(4105)

海绵城市地块汇水区颗粒污染物的传输.....李佳,谢文霞,姜智绘,单溪环,廖云杰,赵洪涛,李叙勇(4113)

天然黄铁矿吸附去除水中Sb(V):性能与机制.....石松,吴乾元,李新正,黄满红(4124)

过硫酸盐氧化处理含砷磷酸废水.....章晋门,卢钧,刘晓琛,陈泉源(4133)

温度对城市污水厌氧生物滤池运行效果与菌群结构的影响.....刘智斌,刘秀红,周桐,章世勇,李健敏,杨庆(4141)

ABR-MBR耦合工艺启动及优化反硝化除磷性能.....缪新年,汪倩,郭凯成,刘文如,沈耀良(4150)

低温下全自养脱氮颗粒污泥适应低基质效能.....刘雨馨,王建芳,钱飞跃,陈倩苗,乔伟,沈聪(4161)

雄安新区土壤重金属地球化学监测关键问题探讨.....郭志娟,周亚龙,杨峥,赵传冬,成杭新,孔牧,彭敏(4169)

基于土壤重金属及PAHs来源的人体健康风险定量评价:以北京某工业污染场地为例.....
.....吴志远,张丽娜,夏天翔,贾晓洋,李慧颖,王世杰(4180)

基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价.....
.....张富贵,彭敏,王惠艳,马宏宏,徐仁廷,成晓梦,侯召雷,陈子万,李括,成杭新(4197)

云南兰坪铅锌矿区优势植物重金属富集特性及应用潜力.....张龙,张云霞,宋波,吴勇,周子阳(4210)

水培试验下水稻Pb吸收累积关键生育期.....胡雨丹,周航,辜娇峰,霍洋,邓鹏辉,魏宾缤,刘俊,廖柏寒(4218)

田间条件下养分调控八宝景天Cd修复效率.....郭俊梅,杨俊兴,杨军,郑国砥,周小勇,陈同斌,卞建林,孟晓飞,李玉峰(4226)

桉树枝条生物炭输入对桂北桉树人工林酸化土壤的作用效果.....
.....段春燕,沈育伊,徐广平,滕秋梅,张德楠,何成新,张中峰,周龙武,孙英杰(4234)

秸秆直接还田和炭化还田对红壤酸度、养分和交换性能的动态影响.....杨彩迪,卢升高(4246)

土壤微生物群落结构对生活源和工业源再生水灌溉的差异化响应.....王燕,程东会,檀文炳,余红,席北斗,姜永海,党秋玲(4253)

粪肥和有机肥施用对稻田土壤微生物群落多样性影响.....理鹏,吴建强,沙晨燕,叶春梅,黄沈发(4262)

松花江下游沿江湿地土地利用变化对土壤细菌群落多样性的影响.....张拓,徐飞,怀宝东,杨雪,隋文志(4273)

黄土高原草地土壤细菌群落结构对于降水变化的响应.....李娜,王宝荣,安韶山,焦峰,黄倩(4284)

土地利用方式对会仙岩溶湿地土壤真菌群落和功能类群的影响.....程跃扬,靳振江,王晓彤,贾远航,袁武,周军波(4294)

黑土真菌群落互作及其与梯度有机质碳分子结构的关系.....尚秋彤,黄瑞林,倪浩为,隋跃宇,孙波,梁玉婷(4305)

贵州茂兰喀斯特森林不同演替下土壤真核微生物多样性.....王显,龙健,李娟,刘灵飞,廖洪凯,李宜蓉,杨睿(4314)

玉米秸秆生物炭固化细菌对镉砷吸附.....刘玉玲,朱虎成,彭鸥,李丹阳,杨蕊蕊,彭晶,铁柏清(4322)

无机态氮素转化机制及水土体氮源识别方法.....梁杏,孙立群,张鑫,张洁,付鹏宇(4333)

《环境科学》征订启事(4061) 《环境科学》征稿简则(4132) 信息(4233, 4293, 4304)

德州市夏季臭氧敏感性特征及减排方案

严茹莎

(上海市环境科学研究院, 国家环境保护城市大气复合污染成因与防治重点实验室, 上海 200233)

摘要: 近年来德州市臭氧污染频发, 2018年夏季(6~8月), 德州市发生了严重臭氧污染事件, 臭氧日最大8h浓度值超标天数达60d, 超标率65%, 3个月平均值为 $176 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 最高达 $262 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 本研究利用WRF-CAMx耦合的HDDM模块, 分析期间德州臭氧敏感性特征及减排方案. 结果表明, 在空间上, 德州市中心城区为VOCs控制区, 而郊区为 NO_x 与VOCs协同控制区. 在时间上, VOCs敏感值每日为正值, 但 $\text{dO}_3\text{-V}_{50}$ 在6月(城区 $18.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 郊区 $19.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)和8月(城区 $15.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 郊区 $16.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)高于7月(城区 $13.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 郊区 $11.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), NO_x 敏感值城区呈正负交错, 郊区大部分为正值, 并与VOCs敏感值接近. 对于城区减排方案应考虑以仅VOCs削减为优先, 而郊区由于 NO_x 和VOCs对臭氧减排效果相当, 建议以 NO_x :VOCs=1:1为优.

关键词: 臭氧; 敏感性分析; 高阶直接去耦合法(HDDM); 减排方案; 时空特征

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)09-3961-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.202001197

Ozone Sensitivity Analysis and Emission Controls in Dezhou in Summer

YAN Ru-sha

(State Environmental Protection Key Laboratory of Formation and Prevention of Urban Air Pollution Complex, Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

Abstract: In recent years, there have been frequent ozone pollution episodes in Dezhou, China. In the summer of 2018 (from June to August), Dezhou experienced serious ozone pollution episodes. The daily 8-hour maximum ozone concentrations exceeded the national standard for 60 days with the standard exceeding ratio of 65%. The average of daily 8-hour maximum ozone concentration was $176 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ over these three months, and the highest value reached was $262 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. In this study, the WRF-CAMx model coupled with the higher-order decoupled direct method (HDDM) was used to analyze the ozone sensitivity and emission control plans in Dezhou during this period. The results showed that ozone formation was in the strong VOC-limited regime in the urban area of Dezhou, while it was in the NO_x and VOCs transition regime in suburban areas. VOCs sensitivity values ($\text{dO}_3\text{-V}_{50}$) were positive every day in summer, which was higher in June ($18.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in urban area, $19.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in suburban area) and August ($15.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in urban area, $16.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in suburban area) than in July ($13.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in urban area, $11.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in suburban area). NO_x sensitivity values ($\text{dO}_3\text{-N}_{50}$) were positive or negative in the urban area, and most days were positive in the suburban area, which were close to the VOCs sensitivity values. For urban areas, VOC reduction should be the priority for emission reduction plans, whereas for suburban areas, NO_x :VOCs=1:1 is recommended because the reductions in NO_x and VOCs emissions had the same effect on ozone pollution control.

Key words: ozone; sensitivity analysis; higher-order decoupled direct method (HDDM); reduction controls; spatial-temporal characteristics

大气中80%~90%的臭氧(O_3)主要集中在平流层中,能起到吸收太阳紫外辐射的作用,但对流层中的 O_3 为痕量气体,如果浓度异常升高会造成人体及动植物的健康损害.因此,防止对流层 O_3 浓度异常升高是大气环境领域最为关注的热点问题之一.对流层 O_3 是由于大气中 NO_x 和VOCs的排放,并在太阳辐射的条件下,通过一系列复杂的化学反应生成的.但对于城市地区,由于城市化进程的加快,导致工业、交通等领域大量排放 NO_x 和VOCs等前体物,促使 O_3 污染问题日益频繁.

由于 O_3 是二次生成的产物,与前体物 NO_x 和VOCs之前存在复杂的非线性关系,对于各个城市或地区而言, O_3 与前体物之前都存在不同的响应关系,因此了解 O_3 生成的敏感性,构建 O_3 浓度与排放之间的响应关系是制定 O_3 前体物削减策略的关键

步骤.早在1990年Sillman等^[1]就利用区域光化学模型探讨了碳氢化合物及 NO_x 与 O_3 生成在美国地区的关系,并建立了三者之间的EKMA关系,随后利用EKMA曲线来表征 O_3 浓度与前体物之间的关系被得到广泛认可,并在国内外普遍应用^[2~5].对于分析 O_3 生成敏感性的手段有多种多样,从观测的角度可基于光指示剂^[6~8]和OBM^[9,10]等手段;从模型的角度出发,可以利用强力法(BFM),Wang等^[11]利用BFM手段,建立不同前体物减排情景,计算珠三角地区 O_3 生成的敏感性,但是其缺点是需要反复计算情景,如果计算情景多需要较高的计算机资源;除此之外,还可以利用直接去耦合法(DDM/

收稿日期: 2020-01-23; 修订日期: 2020-03-25

基金项目: 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0304-18)

作者简介: 严茹莎(1988~),女,硕士,工程师,主要研究方向为空气质量数值模拟, E-mail: yanrs@saes.sh.cn

HDDM) 来计算 O_3 生成敏感性, Cohan 等^[12] 利用 HDDM 的研究手段分析美国东南部地区 O_3 敏感性. 北京、天津夏季 O_3 生成城区均属 VOCs 控制而郊区为 NO_x 和 VOCs 协同控制^[13,14]. Shen 等^[15] 利用 HDDM 计算了珠三角 O_3 生成与前体物之间的关系, 表明不同区域不同时间存在较大差异. DDM/HDDM 与 BFM 相比, 具有效率高、结果稳定和能够准确反映局部灵敏度等优点, 并被广泛应用^[16].

山东省德州市是 2017 年实施秋冬季攻坚方案的“2+26”城市之一, 自方案实施以来, 以 $PM_{2.5}$ 为主的颗粒物污染得到有效治理, 但 O_3 污染问题日益凸显, 对 AQI 达标压力较大, 目前针对德州市 O_3 污染的相关研究基本空缺, 本研究为了初步探清德州 O_3 污染特征, 利用 HDDM 的方法, 分析德州市 O_3 生成敏感性, 以期对德州市 O_3 污染防控提供参考和建议.

1 材料与方法

1.1 WRF-CAMx 模型

本研究采用 WRF-CAMx 空气质量模型系统, 气象场由 WRF-v3.9.1 (Weather Research and Forecasting) 提供^[17]. 为提高计算效率, 采用三层嵌套网格 (D01、D02 和 D03). 中心经纬度为 $110^\circ E$, $34^\circ N$. D01、D02 和 D03 的水平格距分辨率分别为 $36 km \times 36 km$, $12 km \times 12 km$ 和 $4 km \times 4 km$. 模式垂直方向设为 27 层, 模式顶层为 100 hPa. 气象初始场和侧边界资料选用 NCEP/NCAR 的 $1^\circ \times 1^\circ$ 全球再分

析场资料, 边界条件每 6 h 更新一次^[18].

本研究采用的空气质量模型为 CAMx-v6.50 版本^[19], 模型选用 Carbon Bond 05 气相化学机制^[20], 采用 14 层垂直分层, D01 的网格数为 252×243 , D02 的网格数为 228×135 , D03 的网格数为 136×173 . D01 和 D02 采用 MEIC 排放清单^[21]; D03 区域采用 MEIC 清单, 德州市采用本研究团队更新的 2017 年排放清单, 天然源排放清单均由 MEGAN-v2.10 模型计算提供^[22]. 模拟区域示意如图 1 所示.

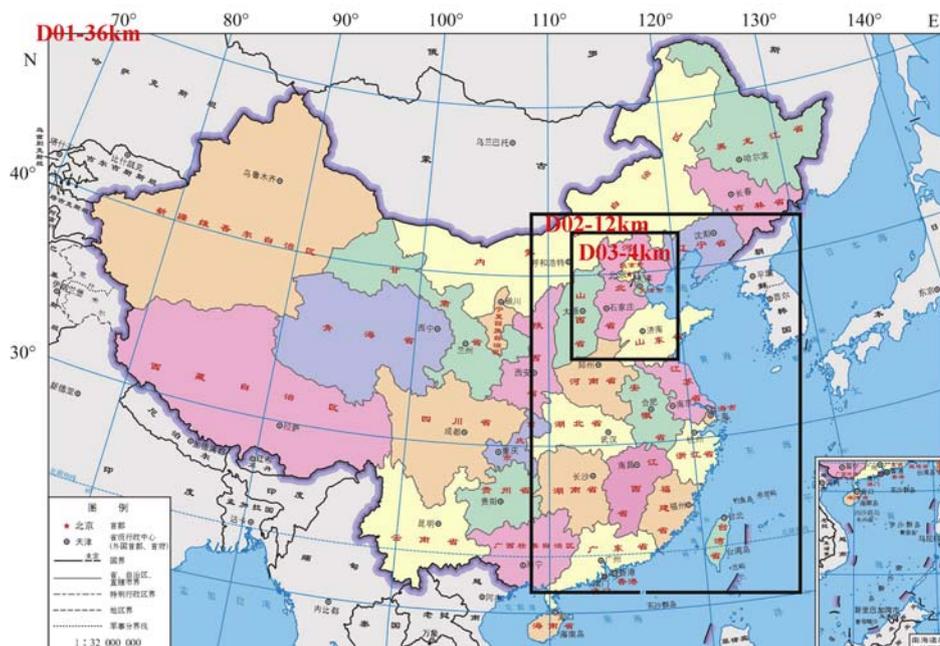
1.2 DDM/HDDM 方法

DDM 方法是直接进行灵敏度计算的一种研究工具^[23~25], 通过直接求解模型的灵敏度方程组得到浓度对某些参数的斜率. 直接去耦合法是利用泰勒展开式的方法, 计算污染物关于多种参数的敏感性, 例如排放速率、初始条件和边界条件、干湿沉降等. 其中 DDM 是计算污染物的一阶敏感性, 但是如 O_3 存在很强的非线性关系, 因此对较大前体物的扰动存在一定的误差, 因此 Hakami 等^[26] 在 DDM 的基础上增加了二阶扰动, 称为高阶直接去耦合法 (HDDM). 其主要计算原理为:

$$S_i^{(1)} = P_i \frac{\partial C}{\partial p_i} = \frac{\partial C}{\partial \varepsilon_i} \quad (1)$$

$$S_{i,j}^{(2)} = P_i \frac{\partial}{\partial p_i} \left(P_j \frac{\partial C}{\partial p_j} \right) = \frac{\partial^2 C}{\partial \varepsilon_i \varepsilon_j} \quad (2)$$

其中公式(1)为一阶敏感性, 即 DDM, 公式(2)为二阶敏感性, 即 HDDM. P_i 为输入参数, 其扰动 P_i 是通过标定变量 ε 来定义的, C 为物种浓度矢量. 一



审图号: GS(2019)1930号

自然资源部 监制

图 1 模型模拟区域示意

Fig. 1 Modeling domain of WRF-CAMx model

阶和二阶敏感性单位与物种浓度单位相一致^[27]. 对于 O_3 浓度关于前体物 NO_x 和 VOCs 的排放而言, 其敏感性可表达为:

$$\Delta O_3 = \Delta N S_N^{(1)} + \frac{1}{2} \Delta N^2 S_N^{(2)} + \Delta V S_V^{(1)} + \frac{1}{2} \Delta V^2 S_V^{(2)} + \Delta N \Delta V S_{NV}^{(2)} \quad (3)$$

其中:

$$S_N^{(1)} = d(O_3)/d(NO_x)$$

$$S_V^{(1)} = d(O_3)/d(VOCs)$$

$$S_N^{(2)} = d^2(O_3)/d(NO_x)^2$$

$$S_V^{(2)} = d^2(O_3)/d(VOCs)^2$$

$$S_{NV}^{(2)} = d^2(O_3)/d(NO_x \cdot VOCs)$$

式中, ΔN 和 ΔV 表示前体物 NO_x 和 VOCs 的减排比例, $S_N^{(1)}$ 为 O_3 浓度关于 NO_x 排放的一阶敏感系数, $S_V^{(1)}$ 为 O_3 浓度关于 VOCs 排放的一阶敏感系数, $S_N^{(2)}$ 为 O_3 浓度关于 NO_x 排放的二阶敏感系数, $S_V^{(2)}$ 为 O_3 浓度关于 VOCs 排放的二阶敏感系数, $S_{NV}^{(2)}$ 为 O_3 浓度关于 NO_x 与 VOCs 排放共同影响的敏感系数.

据报道, HDDM 方法在计算 O_3 浓度时, 如果减排量较大, 会造成较大的偏差^[28], 考虑实际减排可行性, 建议将 50% 扰动作为 HDDM 计算上限^[14]. 对于 O_3 控制类型的计算, 以 NO_x 与 VOCs 削减 50% 所对应的 O_3 浓度变化, 分别记为 $dO_3_N_{50}$ 和 $dO_3_V_{50}$, 作为

判定依据, 当 $dO_3_N_{50} \geq 5 \mu g \cdot m^{-3}$, 且 $dO_3_N_{50} > 2 \times dO_3_V_{50}$ 时为 NO_x 控制区; 当 $dO_3_V_{50} \geq 5 \mu g \cdot m^{-3}$, 且 $dO_3_V_{50} > 2 \times dO_3_N_{50}$ 时为 VOCs 控制区; 当 $dO_3_N_{50} \geq 5 \mu g \cdot m^{-3}$ 或 $dO_3_V_{50} \geq 5 \mu g \cdot m^{-3}$, 但两者差在 2 倍以内时, 为 NO_x 与 VOCs 协同控制; 当 $-5 < dO_3_N_{50} < 5$ 且 $-5 < dO_3_V_{50} < 5$ 时, 为非控制区; 当 $dO_3_N_{50} \leq -5$ 且 $dO_3_V_{50} < 5$ 时, 为 NO_x 滴定区^[14].

1.3 准确性检验

图 2 为模型模拟期间的逐小时模型效果检验, 本研究选择德州市儿童乐园站监测站点(位于城区)以及九衢泉站(位于郊区)进行模型准确性检验. 结果表明, 总体模型可以较好反演 2018 年夏季德州市 O_3 浓度变化趋势, 但是对 6 月有所低估, 7 月和 8 月的模拟准确性较高, 能较好抓住日间 O_3 峰值, 模型可用于后续分析.

为了进一步验证 HDDM 方法的准确性, 本研究额外计算了 1 组 BFM 情景, 计算最大扰动情况下, 即 NO_x 和 VOCs 削减 50% 时的 O_3 浓度, 并选取德州市德城区(城区)和德州市夏津县(郊区)两个网格点进行比较. 结果显示(图 3), HDDM 方法与 BFM 相比, 前体物削减在 50% 以内的削减效果基本一致, 两者相关系数无论是在德州城区还是郊区均可达到 0.99 以上, 因此 HDDM 方法在 0~50% 以内的扰动能够基本与 BFM 方法吻合.

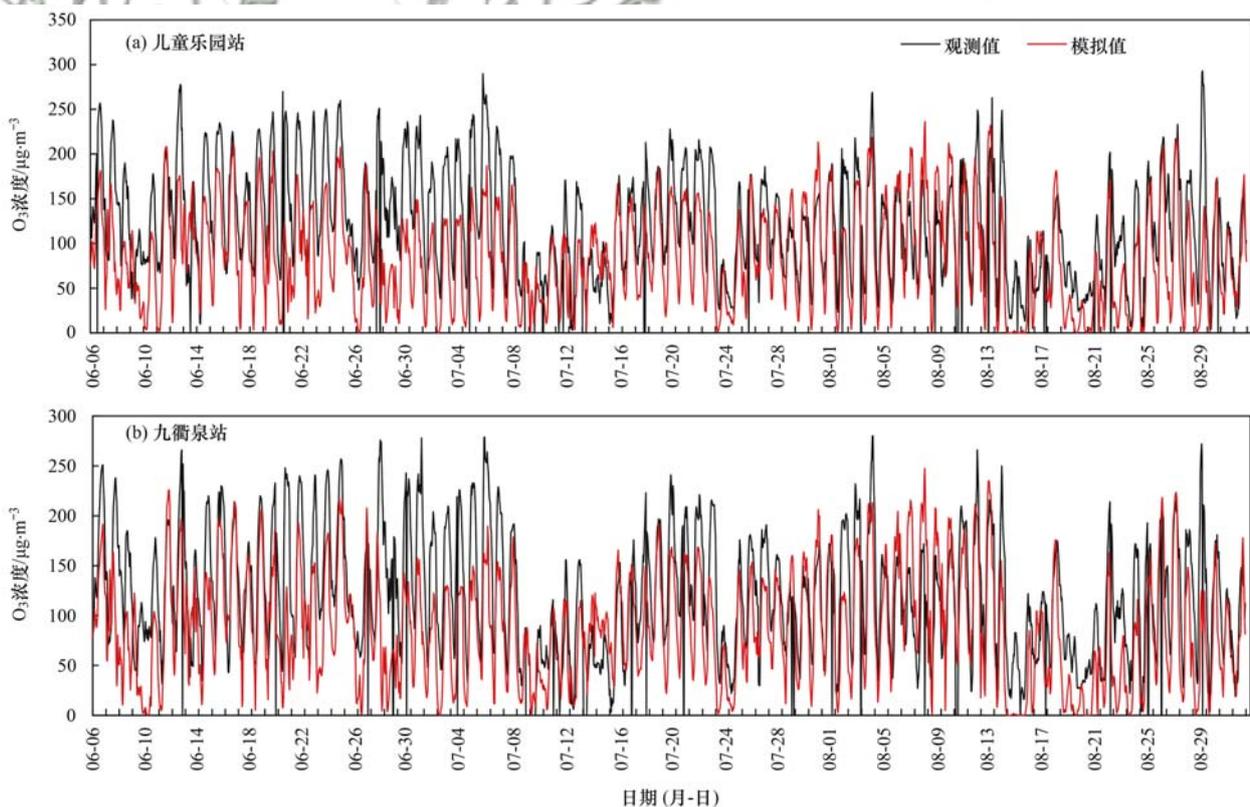


图 2 O_3 浓度时间序列检验

Fig. 2 Validation of O_3 concentrations

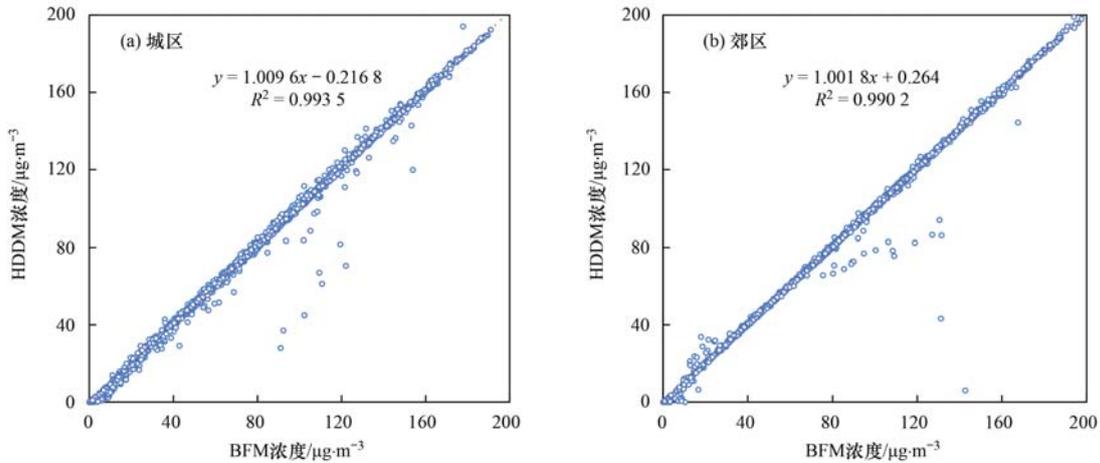


图 3 前体物削减 50% 情景下 HDDM 方法与 BFM 方法相关性检验

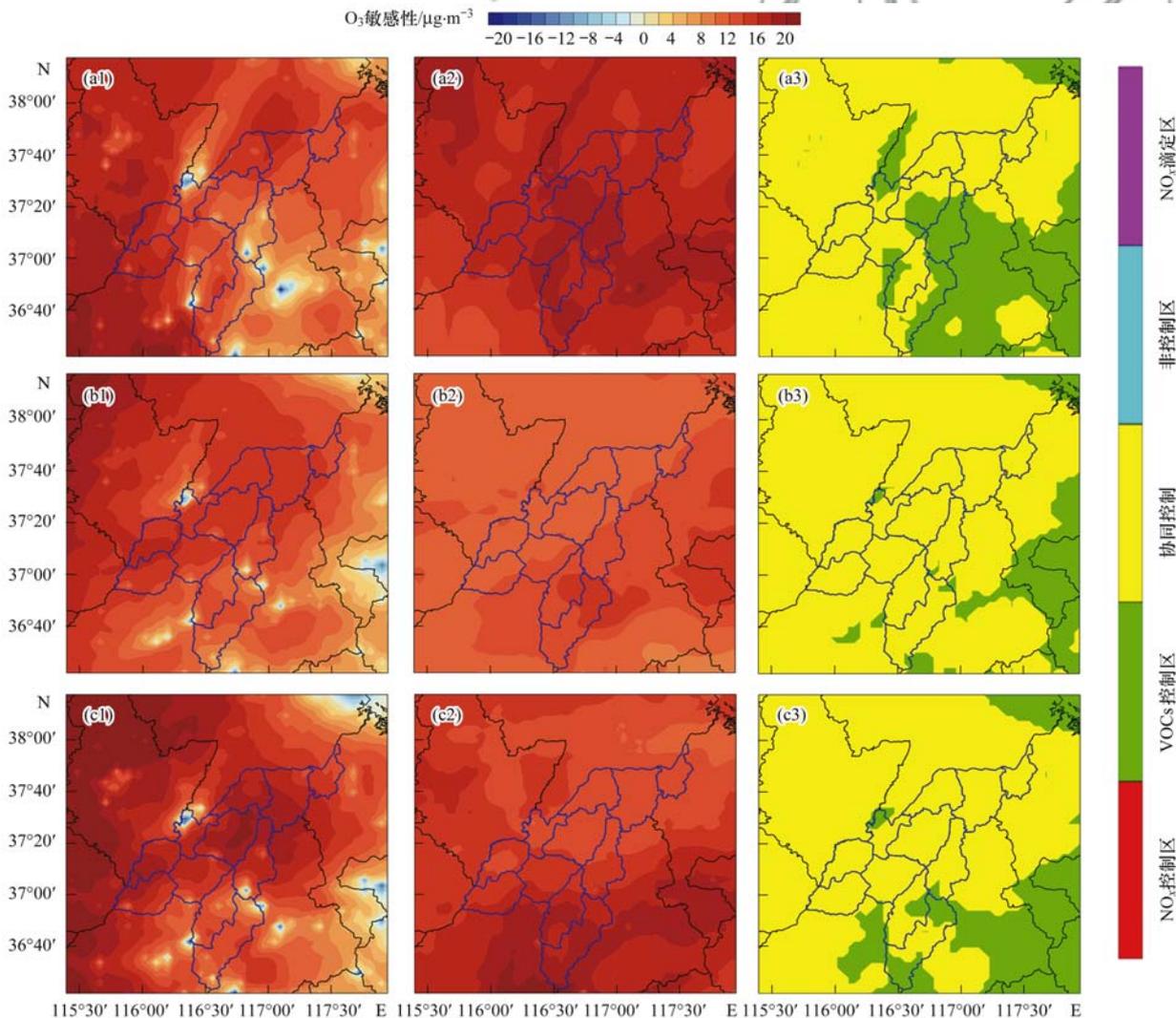
Fig. 3 Correlation tests between HDDM method and Brute-force method under 50% reduction of ozone precursors

2 结果与讨论

2.1 O₃ 敏感性空间特征

根据上述 O₃ 敏感性区域判定方法, 计算 NO_x

和 VOCs 削减 50% 情况下, 2018 年夏季不同月份的 O₃ 日最大 8h 浓度敏感值空间分布, 如图 4 所示. 负值表示负敏感性, 即前体物削减会导致 O₃ 浓度上升; 正值表示正敏感性, 即前体物削减 O₃ 浓度降



(a) 6 月; (b) 7 月; (c) 8 月; 蓝色边界为德州市区域范围

图 4 O₃ 敏感因子区域分布特征

Fig. 4 Spatial distribution of ozone sensitive factors

低. 6月 O_3 对 NO_x 排放的敏感性[图 4(a1)]大部分区域呈现正敏感性,即削减 NO_x 排放易导致德州 6 月日间 O_3 浓度下降,但在德州中心城区,以及南部和西部部分区域呈负敏感性.而 VOCs 减排对 O_3 的生成[图 4(a2)]均表现为正敏感性,并且敏感系数强于 NO_x .从 O_3 敏感区域的划分结果看[图 4(a3)],德州市 6 月日间 O_3 在东北及西南区域属于 NO_x 和 VOCs 协同控制,而城区及东南区域属 VOCs 控制型,对于协同控制型地区,削减 NO_x 和 VOCs 排放均能达到控制 O_3 污染的目标,但对于城区在内的 VOCs 控制区削减 NO_x 会导致 O_3 浓度反弹或没有效果.

7 月 NO_x 和 VOCs 敏感因子的正负分布特征与 6 月相似,但其敏感绝对值均有所下降,从 O_3 敏感区划分结果看[图 4(b3)],协同控制型地区明显增大,而德州城区及南部部分地区仍属于 VOCs 控制区.

8 月 O_3 生成对 NO_x 的敏感值较强,VOCs 的敏感性介于 6 月和 7 月之间, NO_x 削减对德州大部分区域呈现正敏感性,而对德州中心城区和南部区域仍为负敏感性[图 4(c1)],VOCs 敏感性呈现南部强而北部较弱[图 4(c2)].从敏感区域判定结果分析 8 月德州日间 O_3 依然以 NO_x 和 VOCs 协同控制为主,城区及东南部分地区为 VOCs 控制型[图 4(c3)].

综合上述分析,可以看出 6 月和 8 月 O_3 随前体物变化的敏感性相对较强,7 月相对较弱.从空间上看,德州中心城区和郊区的控制类型有所差异,德州中心城区夏季 3 个月均为 VOCs 控制型,即削减 VOCs 排放对控制 O_3 污染效果较好;西南至东北区域在夏季 3 个月均属于 NO_x 和 VOCs 协同控制型,即削减 NO_x 和 VOCs 排放对这些地区均能达到控制 O_3 污染目的;东南部地区呈现 VOCs 控制型和协同控制型交替分布,6 月的 VOCs 控制型的面积占比较大,而 7 月相对面积占比较小. Li 等^[29,30] 和 Wang 等^[31] 的报道也显示,我国城市地区多以 VOCs 控制型为主,而郊区以 NO_x 控制型或两者协同控制为主.德州城区工业发达、交通密集因此属 VOCs 控制型,而下风向的郊区虽然排放密度降低,但是由于德州属于工业城市,依然存在较高的前体物排放,因此德州郊区属于协同控制型,这一规律也符合文献中报道^[32].

2.2 O_3 敏感性时间特征

以上分析是基于日最大 8 h 浓度的月均结果,但是具体到每天,甚至每个小时, O_3 生成敏感系数差异性较大^[11],本研究提取德州德城区网格作为城区[图 5(a)],提取夏津县网格作为郊区[图 5(b)],计算 NO_x 和 VOCs 各削减 50% 比例下 O_3 日最大 8 h 浓度每日敏感性.可以看出,6 月和 8 月的敏感系数变化幅度较大,6 月 $dO_3_N_{50}$ 和 $dO_3_V_{50}$ 月

均值城区分别为 $2.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $18.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,郊区分别为 $19.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $19.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,8 月 $dO_3_N_{50}$ 和 $dO_3_V_{50}$ 月均值城区分别为 $0.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $15.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,郊区分别为 $15.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $16.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.而 7 月的敏感系数较为稳定,城区与郊区均表现为这一特征,城区 $dO_3_N_{50}$ 和 $dO_3_V_{50}$ 分别为 $4.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $13.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,郊区分别为 $15.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $11.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Itahasha 等^[33] 利用 HDDM 发现,中国东部温度较低的冬季 O_3 生成属于强 VOCs 控制型,而随着温度的升高 VOCs 敏感性减弱, NO_x 敏感性增强,这也与本研究结论相一致,温度较低的 6 月 (27.3°C) VOCs 敏感性较强于温度较高的 7 月 (28.4°C).除了 VOCs 均表现为正敏感性外, NO_x 每日呈正负交错的特征,尤其是 6 月和 8 月城区 NO_x 负面感性出现概率较高,因此具体到逐日而言,相同的削减方案对每日的效果均不同,对不同区域也有差异.

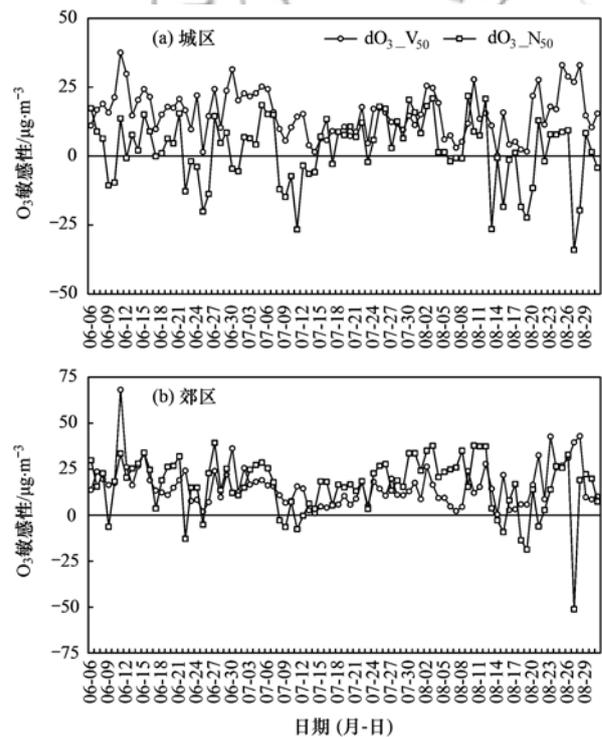


图 5 德州市城区及郊县 O_3 敏感因子逐日变化趋势

Fig. 5 Diurnal variations in ozone sensitive factors in urban and suburban areas of Dezhou

2.3 前体物削减方案

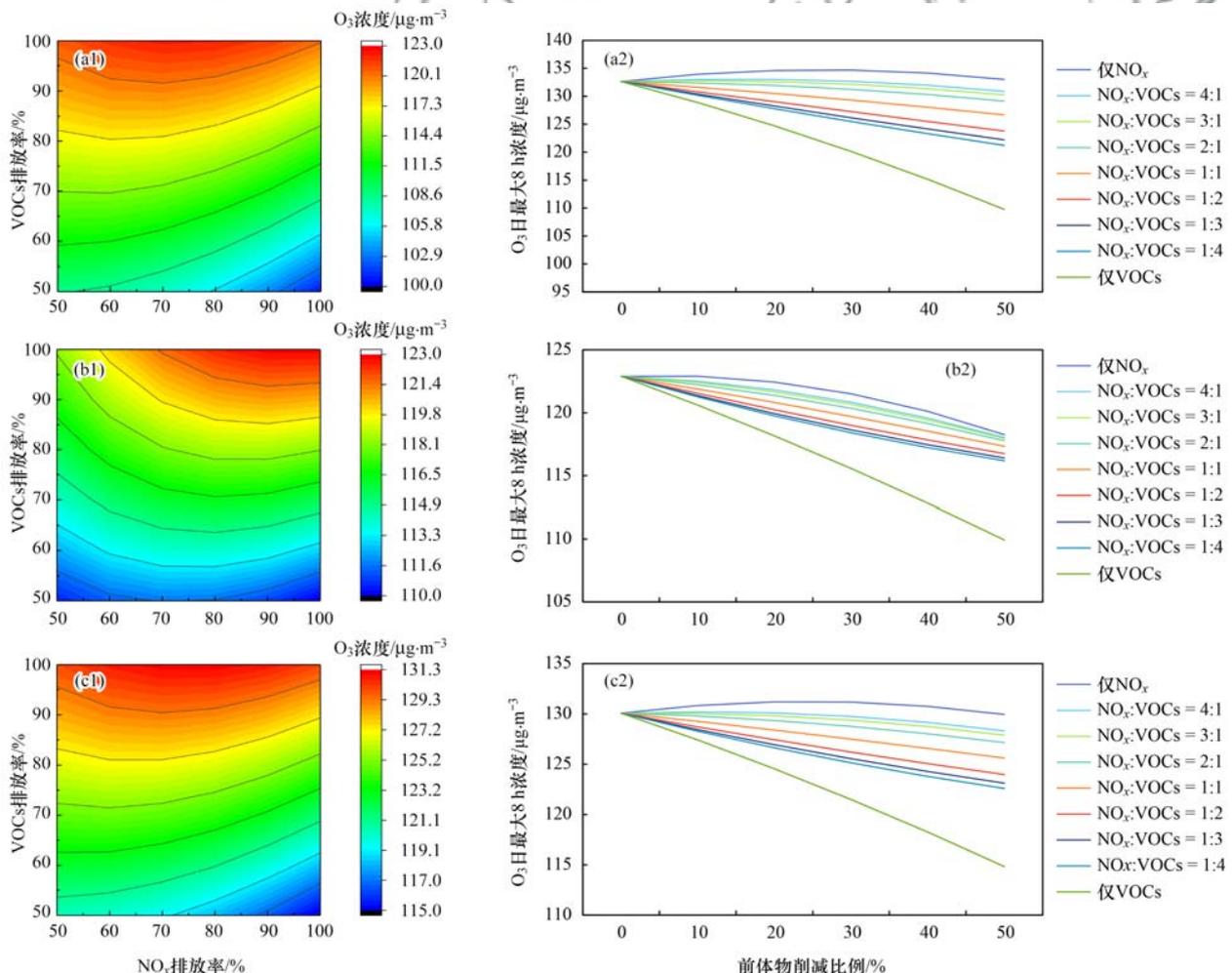
为了进一步说明德州市不同区域 O_3 敏感性特征以及在不同敏感控制区的最优减排方案,提取德州德城区网格为城区站点、夏津县网格为郊区站点,分析其 EKMA 曲线并计算不同前体物控制比例下削减效果,并将最大削减幅度控制在 50% 以内,如图 6 和图 7 所示.前体物削减敏感性测试在 NO_x 和 VOCs 削减比例加和相等的前提下进行,例如,前体物削减比例为 50% 时,对于仅削减 NO_x 排放方案为

NO_x 削减 50%, VOCs 不削减; 对于 NO_x : VOCs = 4:1 而言削减方案为 NO_x 削减 40%、VOCs 削减 10%; 对于 NO_x : VOCs = 3:1 而言削减方案为 NO_x 削减 37.5%、VOCs 削减 12.5%, 以此类推。

从图 6(a) 看出, 城区 6 月在仅削减 NO_x 排放的情况下, O_3 浓度不降反升, 当 NO_x 削减比例为 20% 时, O_3 日最大 8 h 平均浓度将会上升 $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 而直到 NO_x 削减比例达 50% 时, 才能与基准情景相持平。当 NO_x : VOCs = 4:1 时, 前体物排放需要削减至 40% 减排量才能与基准情景持平, 而 NO_x : VOCs = 3:1 时需要削减至 20%, 当 VOCs 的比例进一步增大时, O_3 削减效果越好 [图 6(a2)], 从 EKMA 曲线可以看出, 等值线在 NO_x 削减一侧几乎没有变化或增大而在 VOCs 削减侧数值逐步减小, 即当增加 VOCs 削减比例时, O_3 降幅会变大, 也更进一步说明了德州城区的 NO_x 敏感性较弱而对 VOCs 的敏感性较强。图 6(b) 和图 6(c) 也显示, 在 7 月和 8 月会出现类似情况, 如果仅削减 NO_x 排放, 并且削减力度较

小的情况下 O_3 浓度会有所反弹, 直到 NO_x 和 VOCs 的削减比例小于 3 倍时, O_3 浓度才不会出现反弹, 而随着 VOCs 削减比例的增大, O_3 浓度控制效果也变得更好。因此, 整体德州城区在夏季受 VOCs 排放更敏感, 针对这一特征, 德州城区夏季的最优减排方案应以仅削减 VOCs 排放作为优先考虑, 但如果实际减排情景污染满足这一情况, 也应该严格控制 NO_x 减排量。

对于德州郊县而言 (图 7), 6、7 和 8 月在不同的 NO_x 与 VOCs 削减比例下, O_3 浓度均会下降, 并且在前体物削减比例在 30% 以内时, 各种减排比例得到的 O_3 浓度控制效果较接近, 6 月假设前体物削减 30%, 各类减排情景 O_3 日最大 8 h 浓度月均值可以下降 4%~8%; 7 月各类情景可下降 4%~5%; 8 月各类情景可下降 5%~6%, 研究进一步表明德州郊县 O_3 污染为 NO_x 与 VOCs 协同控制, 即削减 NO_x 与 VOCs 排放均能遏制 O_3 污染, 但考虑实际减排成本建议前体物削减比例以 NO_x : VOCs = 1:1 为德州



(a) 6 月; (b) 7 月; (c) 8 月

图 6 2018 年的 6、7 和 8 月德州城区日最大 8 h 浓度 EKMA 曲线及敏感性测试

Fig. 6 EKMA curves and sensitivity tests of daily 8-hour maximum O_3 concentrations in Dezhou urban area during June, July, and August, 2018

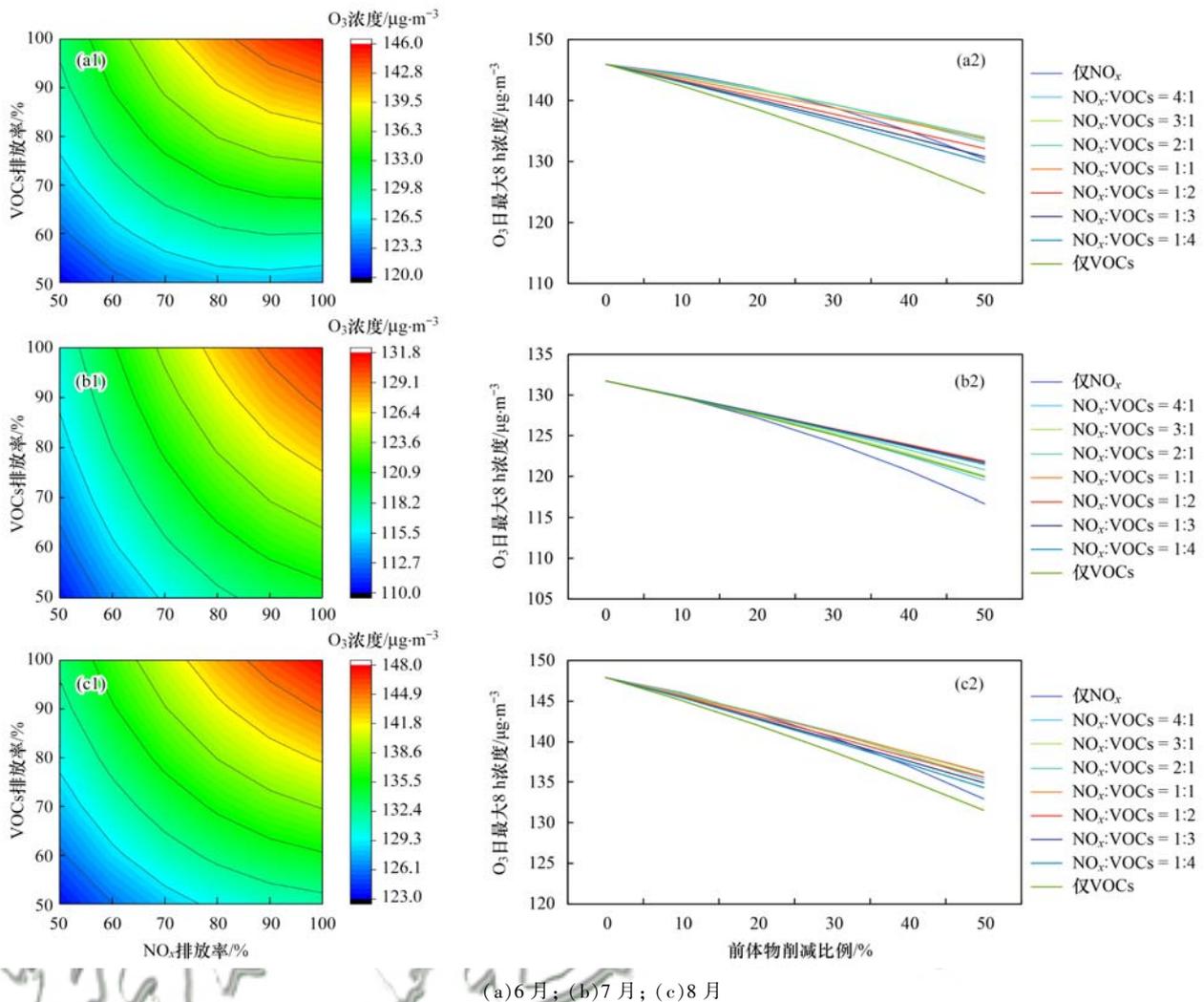


图7 2018年6、7和8月德州郊区日最大8h浓度EKMA曲线及敏感性测试

Fig. 7 EKMA curves and sensitivity tests of daily 8-hour maximum O_3 concentrations in Dezhou suburban area during June, July, and August, 2018

郊区最优减排方案。

3 结论

(1)在空间上,德州市中心城区属VOCs控制型,即削减 NO_x 排放存在 O_3 浓度反弹或无效的风险;郊区为 NO_x 与VOCs协同控制型,即削减 NO_x 或VOCs均能达到控制 O_3 污染的目的。

(2)在时间上,6月和8月的敏感系数变化幅度较大,VOCs敏感值较大,其中6月 dO_3-V_{50} 城区为 $18.7 \mu g \cdot m^{-3}$,郊区为 $19.7 \mu g \cdot m^{-3}$,8月 dO_3-V_{50} 城区为 $15.3 \mu g \cdot m^{-3}$,郊区为 $16.4 \mu g \cdot m^{-3}$,而7月 dO_3-V_{50} 城区和郊区分别为 $13.0 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $11.8 \mu g \cdot m^{-3}$; NO_x 敏感值城区郊区差异较大,城区每日呈正负交错的特征,而郊区大部分为正值,并与VOCs敏感值相接近,6、7和8月 dO_3-N_{50} 分别为 19.1 、 15.0 和 $15.0 \mu g \cdot m^{-3}$ 。

(3)通过对德州城区和郊区前体物削减方案的

分析,由于城区属VOCs控制,因此应考虑以仅VOCs削减为优先,但如果无法满足,要严格控制 NO_x 与VOCs削减比例;而郊区属于 NO_x 和VOCs协同控制型,因此两者减排效果基本相当,考虑实际减排成本建议以 $NO_x:VOCs=1:1$ 为优先。

参考文献:

- [1] Sillman S, Logan J A, Wofsy S C. The sensitivity of ozone to nitrogen oxides and hydrocarbons in regional ozone episodes[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1990, **95** (D2): 1837-1851.
- [2] 李磊, 赵玉梅, 王旭光, 等. 廊坊市夏季臭氧体积分数影响因素及生成敏感性[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4100-4107. Li L, Zhao Y M, Wang X G, et al. Influence factors and sensitivity of ozone formation in Langfang in the summer[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4100-4107.
- [3] Xu J M, Tie X X, Gao W, et al. Measurement and model analyses of the ozone variation during 2006 to 2015 and its response to emission change in megacity Shanghai, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19** (14): 9017-9035.
- [4] Qian Y, Henneman L R F, Mulholland J A, et al. Empirical

- development of ozone isopleths: applications to Los Angeles[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2019, **6**(5): 294-299.
- [5] Ou J M, Yuan Z B, Zheng J Y, *et al.* Ambient ozone control in a photochemically active region: short-term despiking or long-term attainment? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(11): 5720-5728.
- [6] Sillman S. The use of NO_y, H₂O₂, and HNO₃ as indicators for ozone-NO_x-hydrocarbon sensitivity in urban locations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, **100**(D7): 14175-14188.
- [7] Witte J C, Duncan B N, Douglass A R, *et al.* The unique OMI HCHO/NO₂ feature during the 2008 Beijing Olympics: implications for ozone production sensitivity [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(18): 3103-3111.
- [8] Schroeder J R, Crawford J H, Fried A, *et al.* New insights into the column CH₂O/NO₂ ratio as an indicator of near-surface ozone sensitivity [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, **122**(16): 8885-8907.
- [9] Ling Z H, Guo H, Zheng J Y, *et al.* Establishing a conceptual model for photochemical ozone pollution in subtropical Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **76**: 208-220.
- [10] Cheng H R, Guo H, Saunders S M, *et al.* Assessing photochemical ozone formation in the Pearl River Delta with a photochemical trajectory model [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(34): 4199-4208.
- [11] Wang X, Zhang Y, Hu Y, *et al.* Process analysis and sensitivity study of regional ozone formation over the Pearl River Delta, China, during the PRIDE-PRD2004 campaign using the community multiscale air quality modeling system [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(9): 4423-4437.
- [12] Cohan D S, Hakami A, Hu Y T, *et al.* Nonlinear response of ozone to emissions: source apportionment and sensitivity analysis [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(17): 6739-6748.
- [13] 聂滕, 李璇, 王雪松, 等. 北京市夏季臭氧前体物控制区的分布特征 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2014, **50**(3): 557-564.
- Nie T, Li X, Wang X S, *et al.* Characteristics of the spatial distributions of ozone-precursor sensitivity regimes in summer over Beijing [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2014, **50**(3): 557-564.
- [14] 洪礼楠, 黄争超, 秦墨梅, 等. 天津市夏季臭氧污染特征及来源的模拟分析 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2017, **53**(5): 929-938.
- Hong L N, Huang Z C, Qin M M, *et al.* Simulation of pollution characteristics and source apportionment of ozone in Tianjin during summer time [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2017, **53**(5): 929-938.
- [15] Shen J, Zhang Y H, Wang X S, *et al.* An ozone episode over the Pearl River Delta in October 2008 [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **122**: 852-863.
- [16] 王丽涛, 张普, 杨晶, 等. CMAQ-DDM-3D 在细颗粒物 (PM_{2.5}) 来源计算中的应用 [J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(5): 1355-1361.
- Wang L T, Zhang P, Yang J, *et al.* Application of CMAQ-DDM-3D in the source analysis of fine particulate matter (PM_{2.5}) [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(5): 1355-1361.
- [17] 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.
- [18] NCEP. NCEP FNL operational model global tropospheric analyses, continuing from July 1999 [EB/OL]. <https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/index.html>, 2019-06-21.
- [19] CAMx. Comprehensive air quality model with extensions [EB/OL]. <http://www.camx.com/home.aspx>, 2019-07-02.
- [20] Yarwood G, Rao S, Yocke M, *et al.* Updates to the carbon chemical bond mechanism: CB05 [R]. Report to the US Environmental Protection Agency, RT-04-00675, 2005.
- [21] Li M, Zhang Q, Kurokawa J I, *et al.* MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory under the international collaboration framework of the MICS-Asia and HTAP [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(2): 935-963.
- [22] Guenther A B, Jiang X, Heald C L, *et al.* The model of emissions of gases and aerosols from nature version 2.1 (MEGAN2.1): an extended and updated framework for modeling biogenic emissions [J]. *Geoscientific Model Development*, 2012, **5**(6): 1471-1492.
- [23] Yang Y J, Wilkinson J G, Russell A G. Fast, direct sensitivity analysis of multidimensional photochemical models [J]. *Environmental Science & Technology*, 1997, **31**(10): 2859-2868.
- [24] Dunker A M, Yarwood G, Ortman J P, *et al.* Comparison of source apportionment and source sensitivity of ozone in a three-dimensional air quality model [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(13): 2953-2964.
- [25] Napelenok S L, Cohan D S, Odman M T, *et al.* Extension and evaluation of sensitivity analysis capabilities in a photochemical model [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2008, **23**(8): 994-999.
- [26] Hakami A, Odman M T, Russell A G. High-order, direct sensitivity analysis of multidimensional air quality models [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(11): 2442-2452.
- [27] Jin L, Tonse S, Cohan D S, *et al.* Sensitivity analysis of ozone formation and transport for a central California air pollution episode [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(10): 3683-3689.
- [28] Itahashi S, Hayami H, Uno I. Comprehensive study of emission source contributions for tropospheric ozone formation over East Asia [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, **120**(1): 331-358.
- [29] Li K, Jacob D J, Liao H, *et al.* A two-pollutant strategy for improving ozone and particulate air quality in China [J]. *Nature Geoscience*, 2019, **12**(11): 906-910.
- [30] Li K, Jacob D J, Liao H, *et al.* Anthropogenic drivers of 2013-2017 trends in summer surface ozone in China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(2): 422-427.
- [31] Wang T, Xue L K, Brimblecombe P, *et al.* Ozone pollution in China: A review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **575**: 1582-1596.
- [32] Jin X M, Holloway T. Spatial and temporal variability of ozone sensitivity over China observed from the Ozone Monitoring Instrument [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, **120**(14): 7229-7246.
- [33] Itahashi S, Uno I, Kim S. Seasonal source contributions of tropospheric ozone over East Asia based on CMAQ-HDDM [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **70**: 204-217.

CONTENTS

Characterization of Two Heavy Pollution Episodes in Tianjin in 2020	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3879)
Analysis of Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Chengdu Based on the MARGA	YIN Han-mei, CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3889)
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} in Suqian City	MA Hong-lu, ZHAO Xin, LU Jian-gang, <i>et al.</i> (3899)
Characterization and Size Distribution of Carbonaceous Aerosols at Mountain Dinghu	LI An-na, WEN Tian-xue, HUA Wei, <i>et al.</i> (3908)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust in Anshan	LIN Zi, JI Ya-qin, LIN Yu, <i>et al.</i> (3918)
Spectral Characteristics and Source Analysis of WSOC of PM _{2.5} in Winter of Xi'an	YANG Yi, ZHANG Ya-nan, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3924)
Observation of Aerosol Optical Properties and New Particle Formation in the Yangtze River Delta	DU Ying-ying, CHEN Jun, ZHANG Jia-luo, <i>et al.</i> (3932)
Component Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Lianyungang City	CUI Jin-meng, WANG Ti-jian, LI Qiu-tong, <i>et al.</i> (3941)
Seasonal Pollution Characteristics and Analysis of the Sources of Atmospheric VOCs in Chengdu Urban Area	WANG Cheng-hui, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3951)
Ozone Sensitivity Analysis and Emission Controls in Dezhou in Summer	YAN Ru-sha (3961)
Inventory and Distribution Characteristics of China's Thermal Power Emissions Under Ultra-Low Reconstruction	QU Jia-bao, WANG Peng, BO Xin, <i>et al.</i> (3969)
Establishment and Spatial Distribution of Anthropogenic Ammonia Emission Inventory in Zhejiang Province	ZHAO Rui-dong, YU Xing-na, HOU Xin-hong, <i>et al.</i> (3976)
Evaluation and Screening of Dioxin Control Technology in Waste Incineration Flue Gas	ZHAO Si-lan, XI Peng-fei, GUO Feng-yan, <i>et al.</i> (3985)
Characteristics of Stable Isotopes and Moisture Sources of Two Typical Precipitation Events in Lanzhou City	HAN Ting-ting, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (3993)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of the Surface Water in Ranwu Lake Basin	ZHANG Tao, WANG Ming-guo, ZHANG Zhi-yin, <i>et al.</i> (4003)
Chemical Evolution and Formation Mechanism of Groundwater in Hetao Irrigation Area	CUI Jia-qi, LI Xian-yue, SHI Hai-bin, <i>et al.</i> (4011)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Shiqi River Basin	LI Xiao, YU Shi, LI Liang, <i>et al.</i> (4021)
Spatial-temporal Variations and Driving of Nitrogen and Phosphorus Ratios in Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	JI Peng-fei, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4030)
Spatiotemporal Variations in Nutrient Loads in River-lake System of Changdang Lake Catchment in 2016-2017	LI Xin-yan, LI Heng-peng, JIANG San-yuan, <i>et al.</i> (4042)
Influence of <i>Potamogeton crispus</i> on Lake Water Environment and Phytoplankton Community Structure	KANG Li-juan, XU Hai, ZOU Wei, <i>et al.</i> (4053)
Phylogenetic Processes and Key Driving Factors of Bacterial Communities in Jinze Reservoir	LIU Ming-kun, TONG Jun, ZHU Hui-feng, <i>et al.</i> (4062)
Distribution Characteristics of Per-/polyfluoralkyl Substances in River Sediments Around Typical Fluorine Industrial Parks	SUN Lin-ting, ZHAO Zhen, TANG Jian-hui (4069)
Microplastics-Induced Shifts of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in River Water	ZHOU Xin-yuan, WANG Yan-zi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4076)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Lianhua Reservoir	LIAO Jie, WEI Xiao-qin, XIAO Yan-qin, <i>et al.</i> (4081)
Intraspecific Variation in Growth and Alkaline Phosphatase Activity of <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> Strains in Response to Different Phosphorus Concentrations and Sources	YE Jin-mei, ZHAO Li, LUO Xu, <i>et al.</i> (4088)
Simulation of Water Quality Response of Guishui River Wetland Plants and Water Diversion	LI Ya-juan, DU Yan-liang, BI Er-ping, <i>et al.</i> (4095)
Performance Assessment of Field-scale Dry Grass Swale with Shallow Substrate Layer	ZHANG Jia-wei, LI Tian, ZHANG Ting-xiu (4105)
Transition of Particulate Pollutant in the Parcel-based Catchment of Sponge City	LI Jia, XIE Wen-xia, JIANG Zhi-hui, <i>et al.</i> (4113)
Adsorption of Sb(V) in Water by Natural Pyrite: Performance and Mechanism	SHI Song, WU Qian-yuan, LI Xin-zheng, <i>et al.</i> (4124)
Treatment of Wastewater Containing Naphthalene Sulfonic Acid by Persulfate Oxidation	ZHANG Jin-men, LU Jun, LIU Xiao-chen, <i>et al.</i> (4133)
Effect of Temperature on Performance and Microbial Community Structure of Anaerobic Biofilter-Treated Domestic Wastewater	LIU Zhi-bin, LIU Xiu-hong, ZHOU Tong, <i>et al.</i> (4141)
Start-up and Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal in ABR-MBR Coupling Process	MIAO Xin-nian, WANG Qian, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (4150)
Adaptability of Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Granular Sludge to Low-Strength at Low Temperature	LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4161)
Discussion on Key Issues of Geochemical Monitoring of Soil Heavy Metal in Xiongan New District	GUO Zhi-juan, ZHOU Ya-long, YANG Zheng, <i>et al.</i> (4169)
Quantitative Assessment of Human Health Risks Based on Soil Heavy Metals and PAHs Sources: Take a Polluted Industrial Site of Beijing As an Example	WU Zhi-yuan, ZHANG Li-na, XIA Tian-xiang, <i>et al.</i> (4180)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals at Township Scale in the High Background of Heavy Metals, Southwestern, China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, WANG Hui-yan, <i>et al.</i> (4197)
Potential of Accumulation and Application of Dominant Plants in Lanping Lead-zinc Mine, Yunnan Province	ZHANG Long, ZHANG Yun-xia, SONG Bo, <i>et al.</i> (4210)
Key Growth Stage of Pb Accumulation in Rice Through a Hydroponic Experiment with Pb Stress	HU Yu-dan, ZHOU Hang, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Nutrient Regulation and Control on Cd Accumulation Efficiency of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Field Conditions	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> (4226)
Effects of <i>Eucalyptus</i> Branches Biochar Application on Soil Physicochemical Properties of Acidified Soil in a <i>Eucalyptus</i> plantation in Northern Guangxi	DAUN Chun-yan, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (4234)
Dynamic Effects of Direct Returning of Straw and Corresponding Biochar on Acidity, Nutrients, and Exchangeable Properties of Red Soil	YANG Cai-di, LU Sheng-gao (4246)
Different Responses of Soil Microbial Community Structure to Irrigation with Treated Wastewater from Domestic and Industrial Sources	WANG Yan, CHENG Dong-hui, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (4253)
Effects of Manure and Organic Fertilizer Application on Soil Microbial Community Diversity in Paddy Fields	LI Peng, WU Jian-qiang, SHA Chen-yan, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Land Use Changes on Soil Bacterial Community Diversity in the Riparian Wetland Along the Downstream of Songhua River	ZHANG Tuo, XU Fei, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (4273)
Response of Soil Bacterial Community Structure to Precipitation Change in Grassland of Loess Plateau	LI Na, WANG Bao-rong, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (4284)
Effect of Land-use on Soil Fungal Community Structure and Associated Functional Group in Huixian Karst Wetland	CHENG Yue-yang, JIN Zhen-jiang, WANG Xiao-tong, <i>et al.</i> (4294)
Interactions of Fungi Community and Relationship with the Carbon Structure in Arable Mollisols with Gradient Organic Matter Content	SHANG Qiu-tong, HUANG Rui-lin, NI Hao-wei, <i>et al.</i> (4305)
Diversity of Soil Eukaryotic Microbes in Different Succession Stages in Maolan Karst Forest of Guizhou	WANG Xian, LONG Jian, LI Juan, <i>et al.</i> (4314)
Adsorption of Cadmium and Arsenic by Corn Stalk Biochar Solidified Microorganism	LIU Yu-ling, ZHU Hu-cheng, PENG Ou, <i>et al.</i> (4322)
Mechanism of Inorganic Nitrogen Transformation and Identification of Nitrogen Sources in Water and Soil	LIANG Xing, SUN Li-qun, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4333)