

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期
Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM _{2.5} 污染防治的健康效益评估	张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震 (513)
区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估	武文琪, 张凯山 (523)
2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估	姚森, 张哈宇, 王晓琦, 杨书申 (534)
广州市2020年春节期间烟花爆竹燃放对空气质量的影响	裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅 (546)
长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性	夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青 (556)
南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析	张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗 (564)
天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征	丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂 (574)
输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析	张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖 (584)
洛阳市秋冬季PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价	齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青 (595)
郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析	王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩 (604)
基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案	李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦 (616)
汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析	叶露, 邵菁菁, 俞华明 (624)
兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估	郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强 (634)
2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析	李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政 (643)
珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价	王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩 (653)
乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险	史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新 (663)
乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系	王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴 (673)
张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响	王维, 李叙勇 (681)
三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因	杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷 (688)
巢湖沉积物氮磷分布及污染评价	王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平 (699)
巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策	杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌 (712)
氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响	徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇 (723)
降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响	陈敏, 许浩震, 王雪竹, 肖尚斌 (732)
典型喀斯特河流-水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素	刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂茂, 刘文胜 (740)
江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状	王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶 (749)
尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征	黄福义, 朱永官, 苏建强 (761)
涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析	郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生 (766)
天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析	何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良 (776)
秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响	张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏 (786)
环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性	张丽娟, 徐杉, 赵峰, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟 (796)
浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响	黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强 (808)
松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应	于宗灵, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟 (819)
汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测	韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅 (831)
两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物	李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢慧君, 胡振, 张建 (842)
人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除	周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕 (850)
紫外氯胺组消毒供水系统中病毒微生物的分布特征	韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧 (860)
高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除	孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江 (867)
胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性	汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靛, 祝建中 (874)
电凝聚氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析	谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康 (883)
微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制	陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒 (891)
河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌 (900)
南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价	陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗 (909)
复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果	丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江 (917)
石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田	李光辉, 成晴, 陈宏 (925)
叶面喷施纳米MnO ₂ 对水稻富集镉的影响机制	周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣 (932)
典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞 (941)
辣椒果实高中低镉累积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较	邵晓庆, 贺章味, 徐卫红 (952)
4种草本植物对镉的富集特征	陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄 (960)
不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征	熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王鑫燕, 王子芳, 高明 (967)
降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响	高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎 (977)
水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征	林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (988)
铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响	葛艺, 徐民氏, 徐绍辉, 徐艳 (996)
臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响	李品, 周慧敏, 冯兆忠 (1004)
颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述	李源遽, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸢 (1013)
《环境科学》征订启事	(522)
《环境科学》征稿简则	(722)
信息	(748, 899, 924)

基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案

李光耀, 陈强*, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦

(兰州大学大气科学学院, 干旱气候教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 臭氧浓度与其前体物排放在不同地区、不同时刻具有高度非线性关系, 如何精准防控臭氧污染成为了目前研究的难点. 本文基于 WRF-Chem 空气质量模式和自建的乌海市 2018 年大气污染物排放清单, 以 2018 年 8 月 17 ~ 20 日乌海市海勃湾市区的一次臭氧污染过程为例, 利用有交互作用的正交试验研究臭氧及其前体物之间的非线性响应, 揭示臭氧生成敏感性并确定最优控制方案. 结果表明, NO_x 、VOCs 与 CO 的交互作用、CO 排放的污染物和气象场的交互作用是影响海勃湾市区臭氧浓度的主要因素, 在臭氧超标日的 12:00 ~ 18:00 臭氧生成对 NO_x 排放量最为敏感, 当 NO_x 、VOCs 和 CO 协同削减 60%、30% 和 30% 时, 臭氧平均浓度下降最为显著, 为 $12.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (7.8%); 通过对化学反应机制分析得出, VOCs 和 CO 通过与 $\cdot\text{OH}$ 和 HO_2 等自由基反应进而影响整个光化学反应, 是导致 VOCs 与 CO 对臭氧生成存在显著交互作用的原因. 该方法为研究臭氧及其前体物的非线性响应和制定臭氧污染控制方案提供了一种新的思路.

关键词: 臭氧; 正交试验; 交互作用; 一氧化碳 (CO); WRF-Chem 模式

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0616-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007026

Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods

LI Guang-yao, CHEN Qiang*, GUO Wen-kai, ZHANG Rui-xin, XIA Jia-qi

(Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: There is a highly nonlinear relationship between ozone concentrations and its precursor emissions in different regions and at different times, which makes developing effective prevention and control measures difficult. An orthogonal experimental method was introduced to assess the influence of ozone precursors and their interactions on ozone formation, clarify the sensitivity of ozone generation, and propose an optimal control scheme. Based on the WRF-Chem air quality model and an emission inventory of air pollutants in Wuhai City in 2018, this study used an ozone pollution event in the Haibowan urban area (August 17 to 20 2018) to investigate the nonlinear response of ozone formation to its precursors. The orthogonal experiment shows that NO_x , VOCs interactions with CO, CO, and interactions between pollutants and meteorological factors are the main factors affects ozone concentrations in the Haibowan urban area. Ozone generation was most sensitive to NO_x concentrations during the hours 12:00-18:00 when standard values were exceeded. The ozone concentrations decreased significantly by $12.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (7.8%) as NO_x , VOCs, and CO were reduced by 60%, 30%, and 30%, respectively. Through the analysis of chemical reaction mechanisms, it is concluded that VOCs and CO affect the photochemical reaction by reacting with $\cdot\text{OH}$, HO_2 and other free radicals, which causes the significant interaction between VOCs and CO in the generation of ozone. This method provides a new approach for researching the nonlinear response of ozone formation to its precursors and for proposing ozone pollution control schemes.

Key words: ozone; orthogonal experiment; interaction; carbon monoxide (CO); WRF-Chem model

随着我国经济的快速发展以及城市化进程的加快, 大气污染问题引起了广泛的关注. 2015 ~ 2019 年中国城市臭氧浓度整体呈现上升趋势^[1], 且绝大多数城市臭氧未达标, 2019 年 168 个地级及以上城市中以臭氧为首要污染物的超标天数占总超标天数的 46.4%^[2], 在夏季, 近地面臭氧已成为我国大部分区域的首要污染物. 有研究表明, NO_x 和 VOCs 等前体物的排放是导致臭氧污染的根本原因^[3], 臭氧生成与前体物之间存在着非线性响应关系, 不同 VOCs 和 NO_x 浓度及其比值显著影响着臭氧生成的敏感性^[4]. 因此, 明确研究区域臭氧生成敏感性及其

与前体物的关系, 对科学制定臭氧污染防控方案至关重要^[5,6]. 通过设定不同的污染物排放模拟情景, 三维空气质量模型 (如 WRF-Chem 和 WRF-CMAQ 等) 可以量化污染物排放量与臭氧浓度之间的关系, 揭示臭氧生成的气象成因和化学机制, 评价控制措施的可行性, 并确定科学的减排方案^[7].

对各个因素的每一种水平组合进行试验的全面试验方法可准确评价各因素对结果的影响程度, 但

收稿日期: 2020-07-03; 修订日期: 2020-08-15

作者简介: 李光耀 (1996 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境化学, E-mail: ligy18@lzu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: chenqiang@lzu.edu.cn

由于过多的试验次数及计算、时间资源的限制制约了该方法在实际中的应用;单因素试验可考察某一因素对结果的影响,但无法确定因素间的交互作用。正交试验是一种从总体样本中挑选出具有“均匀”和“整齐”特征的代表性样本,有效减少试验次数并能反映出整体变化规律及因素间交互作用的试验方法^[8],已被广泛地应用于工业生产与科学研究领域^[9~11]。郭康^[12]通过正交试验研究得到影响2013年拉萨、舟山和绍兴 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的主次因素顺序为:机动车保有数量>工业增加值>城市面积;肖晔^[13]利用正交试验对2017~2018年供暖季哈尔滨某居住区内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布进行了研究,结果表明交通流量、下垫面构成、车型比例和建筑密度及其高度、布局等对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈现明显的非线性影响,且交通流量影响程度最大;Mohan等^[14]采用正交试验揭示了蒂鲁帕蒂地区 PM_{10} 及其微量成分间的交互作用对环境质量的影响,研究表明虽然CO对环境质量的影响相对较低,但Co(钴)和其他元素(如Ni、Cr等)的协同影响却有着最高的污染指数。

在臭氧污染成因的研究中前体物之间同样对臭氧生成存在交互作用^[15],尚未发现利用正交试验研究臭氧及其前体物非线性关系的相关报道。本文首次引入正交试验方法,研究不同前体物在不同排放水平下对臭氧生成的影响程度,使用区域大气动力-化学耦合模式(WRF-Chem)并以2018年8月17~20日发生在乌海地区的一次臭氧污染过程为例进

行研究,通过直观分析与方差分析方法判断影响臭氧生成的前体物及其交互作用的大小,从而确定臭氧污染的最佳控制方案,以期对臭氧污染管控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 模式简介及参数设置

WRF-Chem模式是由美国大气研究中心(NCAR)、美国国家海洋及大气管理局(NOAA)等共同开发的中尺度大气动力-化学耦合模式,最大的特点是气象与化学模块使用相同的传输方案、模拟网格及时间步长,并且在次网格传输中也使用相同的物理参数化方案,实现了物理与化学过程的实时双向耦合,从而更好地反映大气中的真实情况^[16]。因此,WRF-Chem模式被广泛应用于大气污染成因、来源解析及控制方案制定的研究^[17,18]。

本研究采用WRF-Chem 3.6.1版本,积分时段为2018年8月16日00:00~8月23日00:00(UTC),其中前24 h作为模式spin-up时间,时间分辨率1 h。模式采用MOZART+GOCART化学机制,物理方案采用Lin微物理方案、Grell 3D积云参数化方案、RRTMG长短波辐射方案、ACM2边界层方案及Pleim-Xiu陆面过程方案等。气象输入数据采用美国国家环境预测中心NCEP的FNL全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 数据,时间分辨率为6 h。模拟区域以(40.50°N, 103.8825°E)为中心点,设置分辨率分别为27、9、3及1 km的4层嵌套网格,如图1所示。

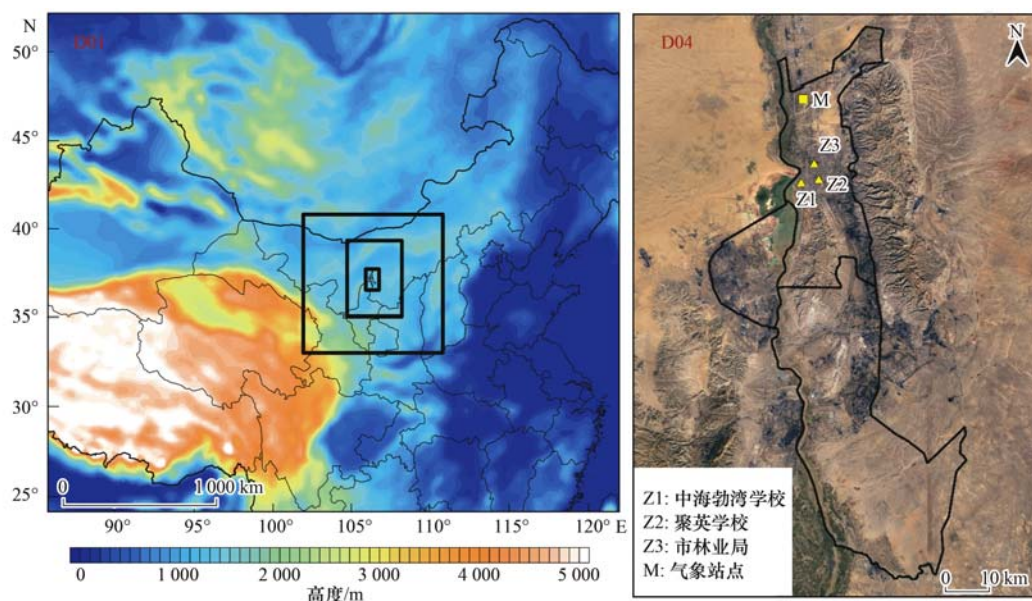


图1 模拟嵌套网格及乌海市行政区划示意

Fig. 1 Simulate nested domains and the administrative division of Wuhai City

1.2 观测资料及污染源排放清单

空气质量监测数据来源于中国环境监测总站的

全国城市空气质量实时发布平台(<http://106.37.208.233:20035/>)提供的乌海市2018年夏季国控站

点臭氧逐小时监测数据. 气象站(以 M 表示,下同)与国控监测站点均位于乌海市海勃湾市区的城市建成区内,其中中海勃湾学校站点(Z1)位于城市公园内、周边为居民区;聚英学校站点(Z2)位于居民区;市林业局站点(Z3)位于植物园内,3 个国控站点相距较近.

污染源排放数据来源于本课题组建立的乌海市 2018 年 1 km × 1 km 高空间分辨率大气污染源排放清单(HEI-WH2018),其中包括化石燃料燃烧源、工

艺过程源、农牧业源、溶剂使用源、生物质燃烧源、扬尘源、移动源、煤炭自燃源、废弃物处理源和餐饮源等在内的 10 类人为源 9 种污染物,天然源 VOCs 排放由 MEGAN 2.1 模型计算得出^[19]. 乌海之外区域采用由清华大学更新的 2016 年中国多尺度排放清单模型(MEIC; <http://www.meicmodel.org>),目前包括中国大陆地区 1990~2015 年 10 种大气污染物和温室气体的排放数据^[20~23]. 图 2 为乌海市 2018 年人为源代表性污染物排放量.

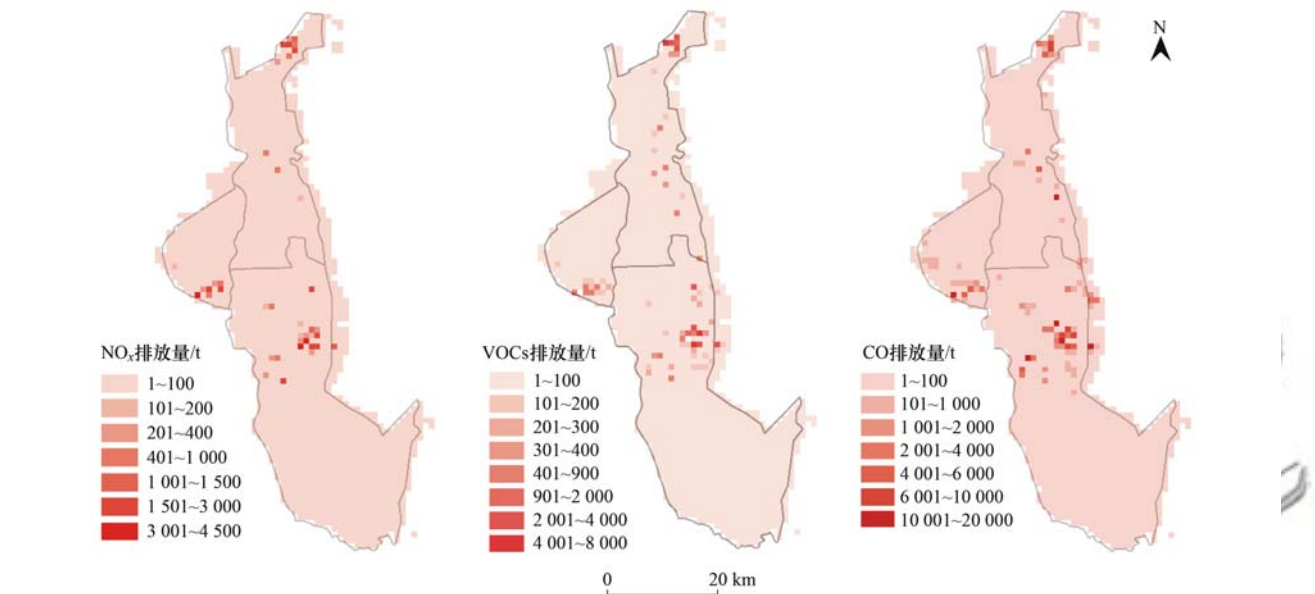


图 2 乌海市 2018 年人为源代表性污染物排放量

Fig. 2 Emission of representative anthropogenic sources in Wuhai City in 2018

1.3 正交试验方法

综合考虑试验次数和前体物削减后排放的水平,选取 L_82^7 正交表(如表 1),根据对正交表设计及分析方法设计试验方案^[24~26]. 基于对乌海市污染源排放特征及削减方案可行性的分析, NO_x 因素水平设置为其削减后与未消减排放量的占比,水平 1 和 2 分别为 0.8 和 0.4; VOCs 及 CO 的水平设置为其削减后与未消减排放量的占比,水平 1 和 2 分别确定为 0.7 和 0.4;考虑的因素有 NO_x 、VOCs、CO 及其两两之间的交互作用,交互作用列(如 $\text{NO}_x \times$

VOCs 和 $\text{NO}_x \times \text{CO}$ 等)反映因素之间的联合作用;在方差分析中,不放置因素或交互作用的空白列通常被认为是试验随机误差对结果影响的误差列,但本研究试验采用模式模拟开展,因此空白列不是由偶然误差产生的误差列,通过分析认为是污染物排放量和气象场交互作用的结果,对空白列的解释可详见 2.2.4 节;试验结果定义为削减污染排放情景与未削减污染排放情景模拟臭氧浓度的差值($\Delta c\text{-O}_3$), $\Delta c\text{-O}_3$ 越小,则削减方案的效果越明显. 由表 1 可知,乌海市 3 个国控站点处 $\Delta c\text{-O}_3$ 变化较为一致.

表 1 正交试验设计表及试验结果 $\Delta c\text{-O}_3/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 1 Orthogonal experimental design table and experimental results $\Delta c\text{-O}_3/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$										
试验组编号	NO_x	VOCs	$\text{NO}_x \times \text{VOCs}$	CO	$\text{NO}_x \times \text{CO}$	VOCs $\times$ CO	空白列	$\Delta c\text{-O}_3$		
								Z1 站点	Z2 站点	Z3 站点
1	0.8	0.7	1	0.7	1	1	1	-6.40	-4.40	-4.70
2	0.8	0.7	1	0.4	2	2	2	0.69	2.65	0.42
3	0.8	0.4	2	0.7	1	2	2	-3.61	-1.58	-2.71
4	0.8	0.4	2	0.4	2	1	1	-1.77	-0.74	-2.68
5	0.4	0.7	2	0.7	2	1	2	-13.86	-10.43	-13.41
6	0.4	0.7	2	0.4	1	2	1	-4.99	-2.57	-5.57
7	0.4	0.4	1	0.7	2	2	1	-6.84	-4.90	-7.40
8	0.4	0.4	1	0.4	1	1	2	-12.68	-10.63	-14.04

除试验组 2 造成臭氧浓度上升外,其他 7 组试验均使臭氧浓度下降,在试验组 5 和试验组 8 的污染物排放水平下臭氧浓度下降最多。

2 结果与讨论

2.1 模拟效果验证

检验模式模拟的可靠性常用相关系数 R 、均方根误差 RMSE、归一化平均偏差 NMB 进行评估,当 R 越接近于 1、RMSE 及 NMB 越接近于 0 时代表模

拟效果越好^[27]。模拟时段内温度、相对湿度、风速及臭氧模拟值与监测值的对比结果如图 3 所示。从中可知,模式对相对湿度及温度的模拟相关系数均在 0.8 以上,NMB 处于 -18.4%~10.7% 之间,但对 10 m 风速模拟的 NMB 为 59.2%;研究区域内 3 个国控站点处臭氧模拟值与监测值的相关系数在 0.66~0.72 之间,归一化平均偏差 NMB 在 35.2%~42% 之间。因此,WRF-Chem 模式能够较好地再现研究时段臭氧污染过程。

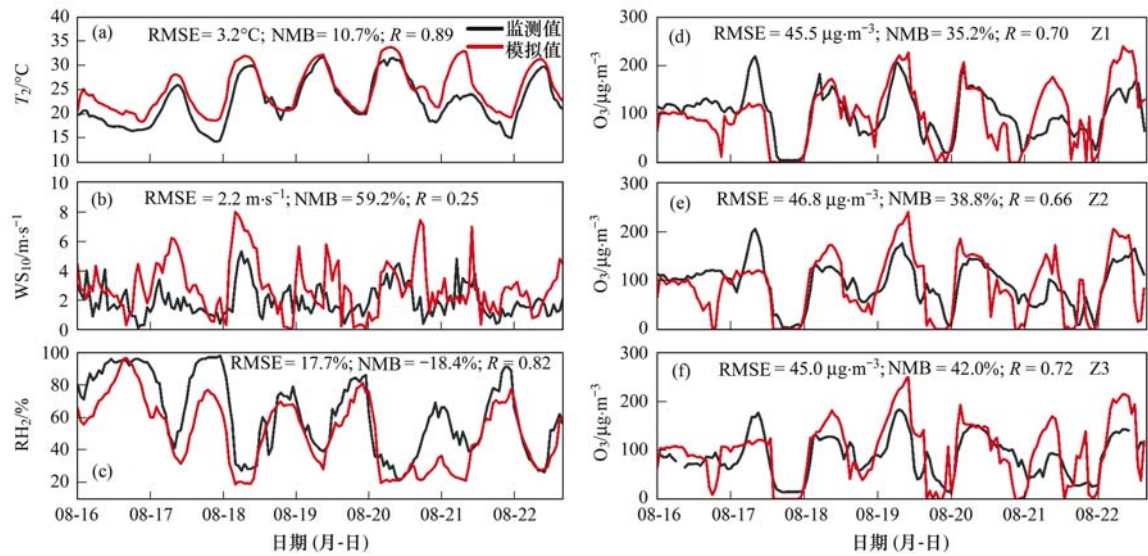


图3 臭氧及 2 m 温度 (T_2)、10 m 风速 (WS_{10})、2 m 相对湿度 (RH_2) 模拟值与监测值比较
Fig. 3 Comparison between simulated and observed values of ozone concentration and T_2 , WS_{10} , RH_2

2.2 正交试验结果分析

2.2.1 极差分析

表 2 给出了 3 个国控站点处 7 个因素的极差分析结果。其中 K_i 表示任一列上水平号为 i (本研究中 $i=1,2$) 时所对应的试验结果之和;在任何一列上,极差值为 $\max(K_1, K_2) - \min(K_1, K_2)$ 。极差大小能够反映相应因素对 $\Delta c-O_3$ 浓度的影响程度。一

般来说,极差大的因素,意味着前体物在不同排放水平下对 $\Delta c-O_3$ 造成的差别较大,通常是主要因素;极差小的因素,意味着其不同排放水平对 $\Delta c-O_3$ 所造成的差别较小,一般是次要因素。因此可根据极差大小判断影响 $\Delta c-O_3$ 浓度的因素主次顺序。由于主要因素水平的变化对 $\Delta c-O_3$ 值影响较大,可优先按照选取该因素的水平,交互作用列可通过两因素

表 2 正交试验极差分析结果/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 2 Range analysis results of the orthogonal experiment/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$							
项目	NO_x	VOCs	$\text{NO}_x \times \text{VOCs}$	CO	$\text{NO}_x \times \text{CO}$	$\text{VOCs} \times \text{CO}$	空白列
Z1- K_1	-11.1	-24.6	-25.2	-30.7	-27.7	-34.7	-20.0
Z2- K_1	-4.1	-14.8	-17.3	-21.3	-19.2	-26.2	-12.6
Z3- K_1	-9.7	-23.3	-25.7	-28.2	-27.0	-34.8	-20.4
Z1- K_2	-38.4	-24.9	-24.2	-18.8	-21.8	-14.8	-29.5
Z2- K_2	-28.5	-17.9	-15.3	-11.3	-13.4	-6.4	-20.0
Z3- K_2	-40.4	-26.8	-24.4	-21.9	-23.01	-15.3	-29.7
Z1-极差	27.29	0.34	1.00	11.97	5.90	19.96	9.46
Z2-极差	24.45	3.10	1.95	10.01	5.77	19.80	7.38
Z3-极差	30.74	3.57	1.35	6.35	3.94	19.58	9.39
Z1-因素主次	$\text{NO}_x > \text{VOCs} \times \text{CO} > \text{CO} > \text{空白列} > \text{NO}_x \times \text{CO} > \text{NO}_x \times \text{VOCs} > \text{VOCs}$						
Z2-因素主次	$\text{NO}_x > \text{VOCs} \times \text{CO} > \text{CO} > \text{空白列} > \text{NO}_x \times \text{CO} > \text{VOCs} > \text{NO}_x \times \text{VOCs}$						
Z3-因素主次	$\text{NO}_x > \text{VOCs} \times \text{CO} > \text{空白列} > \text{CO} > \text{NO}_x \times \text{CO} > \text{VOCs} > \text{NO}_x \times \text{VOCs}$						
最优控制方案	$\text{VOCs}(1) \text{CO}(1) \text{NO}_x(2)^{1)}$						

1) 表示 VOCs 和 CO 均取第一个排放水平(0.7)、 NO_x 取第二个排放水平(0.4)

搭配表的方法计算各个水平搭配下的 $\Delta c\text{-O}_3$ 和,再从中选取最有利的水平搭配组合,从而确定最优控制方案.

由结果可知,在 3 个国控站点处影响臭氧生成的主次因素顺序基本相同, NO_x 、 $\text{VOCs} \times \text{CO}$ 、 CO 及空白列是影响程度前 4 位的因素,其中 NO_x 列极差值均最大,说明 NO_x 的排放浓度变化显著影响臭氧浓度水平,即臭氧生成受 NO_x 浓度敏感;当污染物 NO_x 、 CO 和 VOCs 的排放比例组合为 0.4、0.7 和 0.7 时,3 个国控站点臭氧平均下降浓度(比例)为 $12.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (7.8%),相比基准试验下降最为显著,其中在 8 月 19 日 18:00 市林业局站点臭氧浓度(比例)最高可下降 $88.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (54.9%),这正好是试验 5 所对应的方案. 正交试验结果表明,与仅考虑单因素对臭氧浓度影响相比,因素间的交互作用对臭氧生成也存在着重要的影响,甚至 VOCs 与 CO 的交互作用大于 VOCs 或 CO 单个因素对臭氧生成的影响.

2.2.2 方差分析结果

为弥补直观分析法(极差分析)不能准确估计各因素误差大小以及不能量化各因素对试验结果影响程度的不足,进一步采用方差分析方法,并通过 F 检验法对影响因素进行显著性检验,方差分析结果见表 3. 有研究将影响最小的因素作为误差列^[28],在本文中 Z1 站点处 VOCs 列均方值最小,Z2 及 Z3 站点 $\text{NO}_x \times \text{VOCs}$ 列均方值最小,因此将其视为误差列,不进行显著性分析. 在 3 个国控站点处, NO_x 均通过了 0.01 的显著性检验, $\text{VOCs} \times \text{CO}$ 、空白列、 CO 均通过了 0.05 的显著性检验. 因此,在设定的污染源排放水平下,影响臭氧生成的主次因素依次为 NO_x 、 $\text{VOCs} \times \text{CO}$ 、 CO 、空白列等,臭氧生成明显受 NO_x 浓度变化的影响,这与极差分析结果具有较好的一致性. $\text{VOCs} \times \text{CO}$ 列的 F 值远大于 CO 与 VOCs ,表明二者的交互作用比单因素对臭氧的影响更为显著.

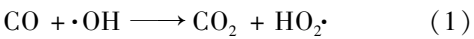
表 3 影响因素方差分析¹⁾

方差来源	Z1 站点			Z2 站点			Z3 站点		
	均方	F 值	显著性	均方	F 值	显著性	均方	F 值	显著性
NO_x	93.1	6 389.7	**	74.7	5 129.8	**	118.1	8 108.4	**
VOCs	0.0		—	1.2	82.6	—	1.6	109.1	—
$\text{NO}_x \times \text{VOCs}$	0.1	8.6	—	0.5		—	0.2		—
CO	17.9	1 229.0	*	12.5	859.2	*	5.0	345.8	*
$\text{NO}_x \times \text{CO}$	4.4	298.7	*	4.2	285.5	*	1.9	133.0	—
$\text{VOCs} \times \text{CO}$	49.8	3 416.9	*	49.0	3 362.0	*	47.9	3 289.2	*
空白列	11.2	768.4	*	6.8	466.7	*	11.0	756.8	*

1) **表示 F 值 $> F_{0.01}(1, 1) = 4\,052.2$,通过 0.01 的显著性检验; *表示 F 值 $> F_{0.05}(1, 1) = 161.5$,通过 0.05 的显著性检验; “—”表示不显著

2.2.3 VOCs 与 CO 对臭氧的协同影响分析

在影响臭氧生成的前体物中, NO_x 与 VOCs 得到了研究者们广泛关注^[29~30]. 本研究通过正交试验结果分析表明,在影响臭氧生成的主次要因素中 CO 的单独作用与协同作用可占至第 2~3 位. 有研究表明 CO 是臭氧生成的重要前体物^[31~34],可通过与 $\cdot\text{OH}$ 反应从而影响臭氧生成. 其中 Yarragunta 等^[35]的研究认为臭氧由 NO_x 、 VOCs 及 CO 在太阳辐射的作用下产生,而大约 90% 的 CO 通过与 $\cdot\text{OH}$ 反应被消耗; Christian 等^[36]的研究表明 $\text{HO}_2\cdot$ 浓度对 CO 较为敏感. 因此 CO 在臭氧生成过程中不容忽视. 由于模式模拟采用 MOZART-4 气相化学机制,本研究依据 Emmons 等^[37]对 MOZART-4 机制的描述,总结了该化学机制中 CO 对臭氧浓度影响的主要化学反应过程概括如下:



从反应式(1)来看,当 CO 浓度增加时,将导致 $\cdot\text{OH}$ 减少和 $\text{HO}_2\cdot$ 增多. MOZART 机制中与 NO 、

$\cdot\text{OH}$ 及 $\text{HO}_2\cdot$ 反应相关的 VOCs 物种主要有: CH_4 、 C_2H_6 、 C_3H_6 、 C_3H_8 、 CH_3COCH_3 、 MEK 、 BIGALK 、 ISOP 、 MVK 、 ONITR 、 TOLUENE 和 $\text{C}_{10}\text{H}_{16}$. 由于这些 VOCs 物种与 $\cdot\text{OH}$ 、 NO 与 $\text{HO}_2\cdot$ 有着相似的反应过程,因此这里以丙酮 CH_3COCH_3 为例,见表 4.

从反应(2)~(5)可知, VOCs 物种首先被 $\cdot\text{OH}$ 氧化为过氧烷基自由基,过氧烷基自由基可替代 O_3 氧化 NO ,使得 O_3 不被消耗并累积下来,与此同时过氧烷基自由基还可与 $\text{HO}_2\cdot$ 进一步反应生成有机过氧化物. 计算表明,当温度 $T = 300 \text{ K}$ 时, $\text{RO}_2\cdot$ 、 $\text{MACRO}_2\cdot$ 、 $\text{PO}_2\cdot$ 、 $\text{C}_3\text{H}_7\text{O}_2\cdot$ 、 $\text{MEKO}_2\cdot$ 、 $\text{ALKO}_2\cdot$ 、 $\text{ISOPO}_2\cdot$ 、 $\text{TOLO}_2\cdot$ 、 $\text{TERPO}_2\cdot$ 与 $\text{HO}_2\cdot$ 的反应速率大于与 NO 的反应速率,而过氧烷基自由基与 $\text{HO}_2\cdot$ 反应生成有机过氧化物的反应速率同样大于有机过氧化物与 $\cdot\text{OH}$ 反应生成过氧烷基自由基的反应速率,因此有机过氧化物将会相对累积下来. 那么 $\cdot\text{OH}$ 减少、 $\text{HO}_2\cdot$ 的增加将会从以下两方面影响光化学反应:① $\cdot\text{OH}$ 的减少将会导致 VOCs 物

表4 CH₃COCH₃ 与·OH、NO、HO₂· 的相关反应
Table 4 Reaction of CH₃COCH₃ with ·OH, NO, and HO₂·

反应编号	主要化学反应	反应速率
(2)	CH ₃ COCH ₃ + ·OH → RO ₂ · + H ₂ O	$3.82 \times 10^{-11} \cdot e^{(-200/T)} + 1.33 \times 10^{-13}$
(3)	RO ₂ · + NO → NO ₂ + CH ₃ CO ₃ + CH ₂ O	$2.9 \times 10^{-12} \cdot e^{(300/T)}$
(4)	RO ₂ · + HO ₂ · → ROOH + O ₂	$8.6 \times 10^{-13} \cdot e^{(700/T)}$
(5)	ROOH + ·OH → RO ₂ · + H ₂ O	$3.8 \times 10^{-12} \cdot e^{(200/T)}$
(6)	NO + HO ₂ · → NO ₂ + ·OH	$3.5 \times 10^{-12} \cdot e^{(250/T)}$

种被氧化为过氧烷基自由基的量减少,HO₂· 的增加导致有机过氧化物的量增多,二者均导致过氧烷基自由基氧化 NO 的量减少,O₃ 氧化 NO 的量增多,最终导致 O₃ 浓度的下降;② HO₂· 可直接代替 O₃ 氧化 NO,造成 O₃ 浓度的累积[反应(6)]。

因此,CO 可通过影响·OH、HO₂· 的量从而影响光化学反应过程。而部分 VOCs 物种可通过与 O₃、·OH或 NO₃等反应或者直接光解的方式进一步生成 CO,因此 VOCs、CO 与 O₃ 之间相互影响,这也从 MOZART 气相化学机制的角度解释了正交试验

中 VOCs 与 CO 的协同作用对 O₃ 产生的影响。

2.2.4 空白列

由 3 个站点分析结果可知空白列的重要程度位于第 3~4 位,因此很可能忽略了对 Δ*c*-O₃ 产生重要影响的某种因素,需要进一步进行分析。由于 WRF-Chem 是一个气象模块与化学模块在线耦合、实时反馈的模式^[16],因此当一次前体物排放量发生变化时,气象场也随之变化,从而对臭氧等二次生成污染物产生影响。如表 5 和图 4 所示,为验证该想法,提取模式模拟结果中 Z1 站点处的 10 m 风速、2 m 温

表5 源强变化对气象因子(平均值)的影响¹⁾
Table 5 Influence of emissions variations of pollution sources on meteorological factors

试验组编号	10 m 风速/m·s ⁻¹	温度/℃	相对湿度/%	向下短波辐射/W·m ⁻²
基准试验	2.99	24.40	52.86	284.25
1	2.79	24.28	52.92	281.01
2	2.90	24.29	53.41	280.18
3	2.95	24.20	52.85	278.69
4	2.93	24.39	51.99	281.86
5	3.08	24.35	52.63	284.20
6	2.85	24.40	52.81	285.56
7	2.81	24.32	52.93	281.68
8	3.17	24.28	52.92	285.88
影响程度/%	-6.7~6	-0.8~0.0	-1.6~1.0	-2.0~0.6

1) 影响程度 = (敏感性试验 - 基准试验)/基准试验

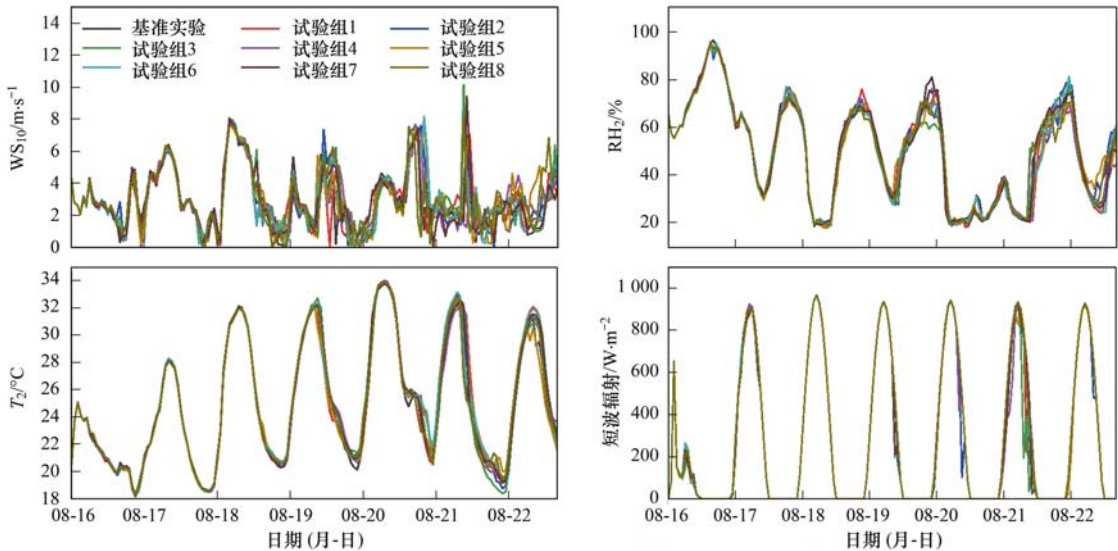


图4 源强变化对 2 m 温度(T₂)、10 m 风速(WS₁₀)、2 m 相对湿度(RH₂)和短波辐射的影响(Z1 站点)

Fig. 4 Influence of emissions variation of pollution sources on T₂, WS₁₀, RH₂, and shortwave radiation (Z1 site)

度、2 m 相对湿度及短波辐射等因子进行对比。由结果可知,污染物排放量的改变对风速、温度、相对湿度和辐射均产生了影响,影响程度分别为: $-6.7\% \sim 6\%$ 、 $-0.8\% \sim 0.0\%$ 、 $-1.6\% \sim 1.0\%$ 和 $-2.0\% \sim 0.6\%$ 。其中在同一模拟时刻(8月21日18:00)的不同排放情景下,风速最大可相差 $8.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,这对污染物的传输、扩散和沉降等物理化学过程起着相当大的影响。因此,排放污染物和气象场的交互作用可能是造成极差较大的原因。

3 结论

(1) 正交试验在研究臭氧与其前体物的非线性响应关系,特别是量化前体物对臭氧的交互作用具有良好的效果。正交试验具有试验次数少并能反映出整体变化规律的特点,避免了全面试验带来的计算资源及时间的限制,具有很好的可行性;能够更好地揭示各因素及其因素之间交互作用对试验结果的影响。

(2) 正交试验方法能够判断影响臭氧生成的主要因素,可用于在设定的污染物排放水平下最佳削减方案的确定。

(3) 通过对正交试验结果分析表明,在乌海地区 CO 的单独作用及与 VOCs 的交互作用对臭氧生成有着不容忽视的影响,并进一步根据气相化学机制解释了这种协同影响。

(4) WRF-Chem 模式中污染物排放量的变化与气象场对臭氧浓度存在明显的交互作用,这可能是造成空白列极差值较大的原因,同时也为污染成因研究和数值天气预报的进一步优化提供了新的信息。

参考文献:

- [1] Zhao S P, Yin D Y, Yu Y, *et al.* PM_{2.5} and O₃ pollution during 2015-2019 over 367 Chinese cities: spatiotemporal variations, meteorological and topographical impacts [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **264**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114694.
- [2] 中华人民共和国生态环境部. 2019 中国生态环境状况年报 [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202006/P020200602509464172096.pdf>, 2020-05-18.
- [3] 张远航, 邵可声, 唐孝炎, 等. 中国城市光化学烟雾污染研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1998, **34**(2-3): 392-400.
- [4] Zhang Y H, Shao K S, Tang X Y, *et al.* The study of urban photochemical smog pollution in China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1998, **34**(2-3): 392-400.
- [5] Cardelino C A, Chameides W L. An observation-based model for analyzing ozone precursor relationships in the urban atmosphere [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1995, **45**(3): 161-180.
- [6] 李敏辉. 顺德区臭氧污染成因与控制对策建议[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [7] Li M H. Study on the reasons and controlling countermeasures of ozone pollution in Shunde [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [8] 吴小芳. 基于区域多尺度空气质量模型对杭州市大气污染的模式研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [9] Wu X F. Model study of air pollution in Hangzhou City based on community multiscale air quality modeling system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [10] 庞超明, 黄弘. 试验方案优化设计与数据分析[M]. 南京: 东南大学出版社, 2018.
- [11] Xu C W, Nie W, Yang S B, *et al.* Numerical simulation of the multi-index orthogonal experiments on the spray dust-settling devices[J]. *Powder Technology*, 2020, **371**: 217-230.
- [12] Ayhan V, Çangal C, Cesur I, *et al.* Optimization of the factors affecting performance and emissions in a diesel engine using biodiesel and EGR with Taguchi method[J]. *Fuel*, 2020, **261**, doi: 10.1016/j.fuel.2019.116371.
- [13] Abbasi F, Yarak M T, Farrokhnia A, *et al.* Keratin nanoparticles obtained from human hair for removal of crystal violet from aqueous solution: optimized by Taguchi method[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, **143**: 492-500.
- [14] 郭康. 关于 PM_{2.5} 影响因素的统计分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
- [15] Guo K. The statistical analysis on the influencing factors of PM_{2.5} [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014.
- [16] 肖晔. 严寒地区城市住区内 PM_{2.5} 浓度分布及室内外关联性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [17] Xiao Y. Research on PM_{2.5} concentration distribution and indoor-outdoor correlation in urban residential areas in severe cold regions[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [18] Mohan S V, Mouli P C. Assessment of aerosol (PM₁₀) and trace elemental interactions by Taguchi experimental design approach [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2008, **69**(3): 562-567.
- [19] 马晓丹, 赵天良, 胡俊, 等. 南京地区一次臭氧污染过程的行业排放贡献研究[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(1): 105-115.
- [20] Ma X D, Zhao T L, Hu J, *et al.* Modeling study on emission contributions to an ozone pollution episode in Nanjing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(1): 105-115.
- [21] Grell G A, Peckham S E, Schmitz R, *et al.* Fully coupled "online" chemistry within the WRF model [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(37): 6957-6975.
- [22] Wang P F, Qiao X, Zhang H L. Modeling PM_{2.5} and O₃ with aerosol feedbacks using WRF/Chem over the Sichuan Basin, southwestern China[J]. *Chemosphere*, 2020, **254**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126735.
- [23] Ni Z Z, Luo K, Gao Y, *et al.* Spatial-temporal variations and process analysis of O₃ pollution in Hangzhou during the G20 summit [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(10): 5963-5976.
- [24] Guenther A, Karl T, Harley P, *et al.* Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature)[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **6**(11): 3181-3210.
- [25] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, *et al.* Asian emissions

- in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(14): 5131-5153.
- [21] Liu F, Zhang Q, Tong D, *et al.* High-resolution inventory of technologies, activities, and emissions of coal-fired power plants in China from 1990 to 2010 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(23): 13299-13317.
- [22] Zheng B, Huo H, Zhang Q, *et al.* High-resolution mapping of vehicle emissions in China in 2008 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(18): 9787-9805.
- [23] Li M, Zhang Q, Streets D G, *et al.* Mapping Asian anthropogenic emissions of non-methane volatile organic compounds to multiple chemical mechanisms [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(11): 5617-5638.
- [24] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 35-77.
- [25] 邱轶兵. 试验设计与数据处理[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008. 77-162.
- [26] 赵选民. 试验设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 64-118.
- [27] 陈焕盛, 王文丁, 田敬敬, 等. 三维变分在 PM_{2.5} 重污染数值模拟中的应用研究[J]. *中国环境监测*, 2020, **36**(2): 64-74.
- Chen H S, Wang W D, Tian J J, *et al.* Application of three-dimensional variational data assimilation on simulation of PM_{2.5} heavy pollution[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020, **36**(2): 64-74.
- [28] 薛源. 基于正交分析的复杂抗性消声器优化设计[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- Xue Y. Optimization design of complex resistant muffler based on the orthogonal analysis[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [29] Wang M, Chen W T, Zhang L, *et al.* Ozone pollution characteristics and sensitivity analysis using an observation-based model in Nanjing, Yangtze River Delta Region of China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **93**: 13-22.
- [30] Kumar A, Singh D, Anandam K, *et al.* Dynamic interaction of trace gases (VOCs, ozone, and NO_x) in the rural atmosphere of sub-tropical India [J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2017, **10**(7): 885-896.
- [31] 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.
- [32] Akagi S K, Yokelson R J, Wiedinmyer C, *et al.* Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(9): 4039-4072.
- [33] Singh H B, Kanakidou M, Crutzen P J, *et al.* High concentrations and photochemical fate of oxygenated hydrocarbons in the global troposphere[J]. *Nature*, 1995, **378**(6552): 50-54.
- [34] Kumar A, Bali K, Singh S, *et al.* Estimates of reactive trace gases (NMVOCs, CO and NO_x) and their ozone forming potentials during forest fire over Southern Himalayan region[J]. *Atmospheric Research*, 2019, **227**: 41-51.
- [35] Yarragunta Y, Srivastava S, Mitra D, *et al.* Source attribution of carbon monoxide and ozone over the Indian subcontinent using MOZART-4 chemistry transport model [J]. *Atmospheric Research*, 2019, **227**: 165-177.
- [36] Christian K E, Brune W H, Mao J Q, *et al.* Global sensitivity analysis of GEOS-Chem modeled ozone and hydrogen oxides during the INTEX campaigns[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(4): 2443-2460.
- [37] Emmons I K, Walters S, Hess P G, *et al.* Description and evaluation of the model for ozone and related chemical tracers, version 4 (MOZART-4) [J]. *Geoscientific Model Development*, 2010, **3**(1): 43-67.

CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, YANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangsuhai Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangsuhai	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)