

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

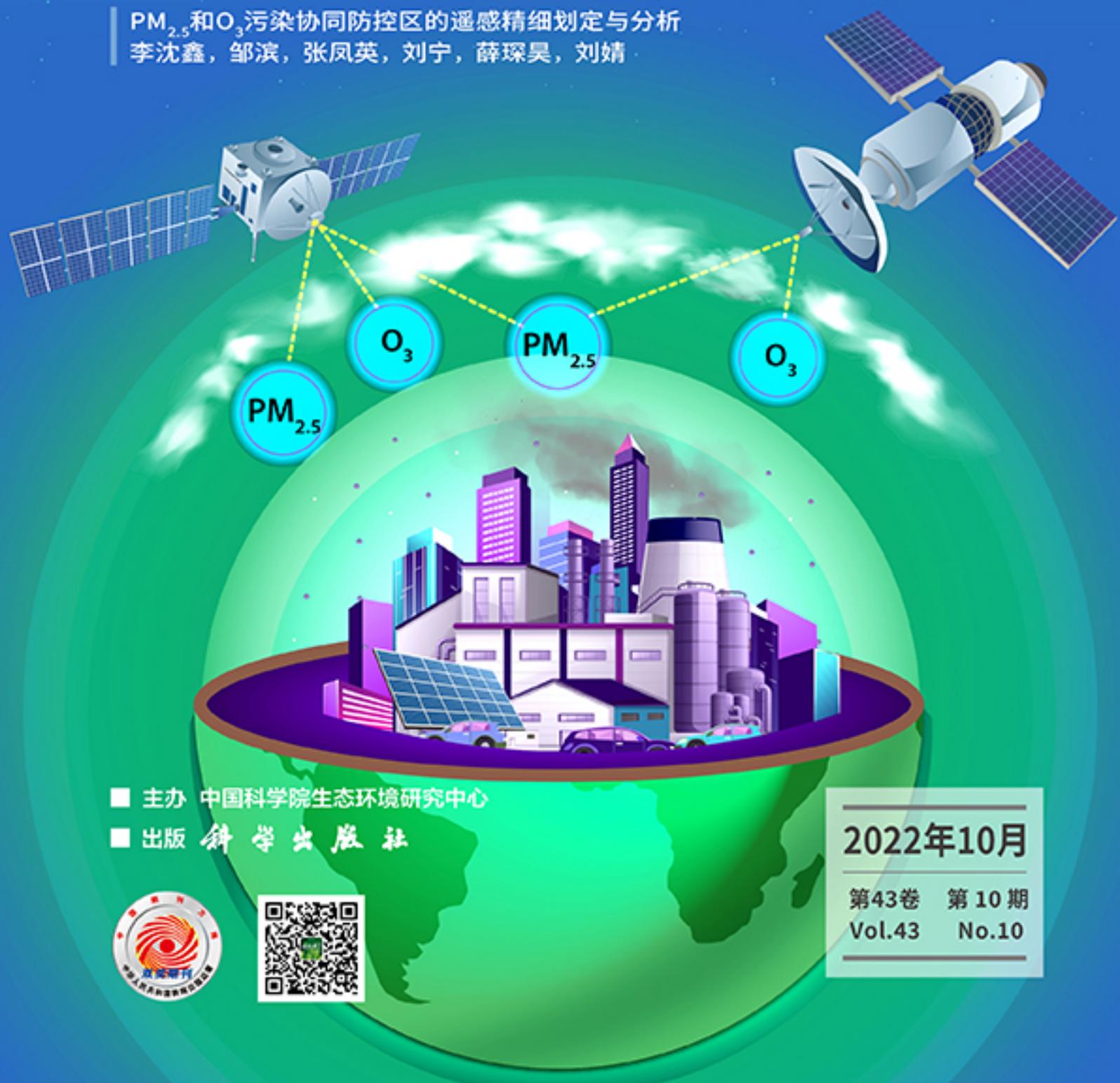
# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>污染协同防控区的遥感精细划定与分析  
李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年10月

第43卷 第10期  
Vol.43 No.10

目次

PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>污染协同防控区的遥感精细划定与分析 ..... 李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧(4293)

广州市冬季一次典型臭氧污染过程分析 ..... 裴成磊, 谢雨彤, 陈希, 张涛, 邱晓暖, 王瑜, 王在华, 李梅(4305)

佛山臭氧浓度预报方程的建立与应用 ..... 陈辰, 洪莹莹, 谭浩波, 司徒淑婷, 程银琳, 步巧利, 吴蒙, 潘巧英(4316)

乌海市高分辨率大气污染源排放清单构建及其在臭氧污染成因探究中的应用 ..... 张瑞欣, 楚波, 尚春林, 曹喜萍, 李光耀, 朱玉凡, 刘晓, 夏佳琦, 陈强(4327)

结合在线监测和自动识别系统分析东海沿岸船舶排放特征 ..... 邱浩, 刘丹彤, 吴杨周, 李思远, 丁朔, 胡康, 张家乐, 陈梅汀(4338)

机动车制动磨损颗粒物及挥发性有机物的组分特征 ..... 门正宇, 刘笃优, 郭全有, 张静, 彭剑飞, 吴琳, 毛洪钧(4348)

笼养鸡舍冬季挥发性有机物排放特征 ..... 曹甜甜, 郑云昊, 张羽, 王悦, 丛群欣, 王源昊, 董红敏(4357)

上海市生活垃圾房气溶胶中可培养细菌污染状况及种群特征 ..... 卢冰洁, 张翔, 王川, 邱俊, 李丹(4367)

浙江省2008~2018年人为源氨排放清单及分布特征 ..... 方利江, 杨一群, 叶观琼(4380)

“双碳”目标下钢铁行业控煤降碳路线图 ..... 薛英岚, 张静, 刘宇, 陈瑜, 孙健, 蒋洪强, 张伟, 曹东(4392)

空间关联网络结构特征的减排效应:基于城市群视角 ..... 郑航, 叶阿忠(4401)

中国对外直接投资的减污降碳效应及其实现机制 ..... 白梓函, 吕连宏, 赵明轩, 张楠, 罗宏(4408)

近年全国地表水水质变化特征 ..... 嵇晓燕, 侯欢欢, 王姗姗, 杨凯(4419)

湟水河流域地表水体微塑料分布、风险及影响因素 ..... 范梦苑, 黄懿梅, 张海鑫, 李好好, 黄倩(4430)

汾河流域地表水水化学同位素特征及其影响因素 ..... 赵春红, 申豪勇, 王志恒, 梁永平, 赵一, 谢浩, 唐春雷(4440)

城镇化进程中珠江三角洲高锰地下水赋存特征及成因 ..... 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 李海军(4449)

喀什噶尔河下游平原区地下水咸化特征及成因分析 ..... 鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 孙英(4459)

重庆市老龙洞地下河流域硝酸盐来源和生物地球化学过程的识别 ..... 王雨吻, 杨平恒, 张洁茹(4470)

蓝藻水华过程中优势种群演替模式、效应及驱动因子分析 ..... 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李佳欣, 李玉鑫, 施军琼, 吴忠兴(4480)

珠海市磨刀门水道输水水源水库群浮游植物群落特征及其环境驱动因子 ..... 张茉莉, 王思瑞, 昌盛, 王山军, 金德才, 樊月婷, 张坤锋, 谢琼, 付青(4489)

营养物质对铜绿微囊藻生长和藻际细菌的影响 ..... 吕萍, 李慧莉, 徐勇, 郑效旭, 黄振华, 王聪, 徐圣君, 庄绪亮(4502)

老化作用对微塑料吸附四环素的影响及其机制 ..... 王林, 王姝歆, 曾祥英, 何杨, 黄雯, 郑世界, 张建强(4511)

沉积物和土壤中胶体对氯霉素吸附行为的影响 ..... 晏彩霞, 罗燕清, 聂明华, 周旋, 丁明军(4522)

历史抗生素胁迫改变磺胺甲噁唑和甲氧苄啶对活性污泥的影响:ARGs及其潜在宿主 ..... 张忠兴, 樊晓燕, 李星, 高玉玺, 赵君如(4536)

阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析 ..... 陈盟, 潘泳兴, 黄奕翔, 王樞檀, 张睿东(4545)

白洋淀及周边土壤重金属的分布特征及生态风险评估 ..... 郑飞, 郭欣, 汤名扬, 朱冬, 董四君, 康乐, 陈兵(4556)

基于地理探测器的镇域尺度土壤重金属含量空间分异及其影响因素分析 ..... 龚仓, 王亮, 王顺祥, 张志翔, 董航, 刘玖芬, 王德伟, 严步青, 陈映(4566)

燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险 ..... 车凯, 陈崇明, 郑庆宇, 范辉, 魏明磊, 罗蓬, 郁金星(4578)

海南岛半干旱区农用地土壤重金属富集因素、健康风险及来源识别 ..... 杨剑洲, 龚晶晶, 王振亮, 高健翁, 杨建坤, 胡树起, 唐世新(4590)

九龙江口红树林表层沉积物重金属赋存形态及污染评价 ..... 张华兰, 于瑞莲, 万瑞安, 胡恭任, 黄华斌, 吴雅清(4601)

我国茶叶主产区有机肥重金属含量现状 ..... 伊晓云, 方丽, 杨向德, 马立锋, 刘美雅, 张群峰, 倪康, 石元值(4613)

甘肃省农业土壤邻苯二甲酸酯累积特征及来源分析 ..... 陈王玉, 张光全, 张杨, 李明凯, 郝佳欣, 熊有才, 李崇霄, 曹靖(4622)

三峡库区澎溪河不同高程消落带土壤磷形态及磷酸酶活性分布特征 ..... 高艺伦, 方芳, 唐子超, 张蕊, 蒋艳雪, 郭劲松(4630)

塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳组分特征及其与理化因子的相关性 ..... 李昕竹, 贡璐, 唐军虎, 罗艳, 丁肇龙, 朱海强, 张涵, 李蕊希(4639)

黄土丘陵区柠条人工林不同深度土壤呼吸速率对土壤湿度的响应 ..... 孙亚荣, 王亚娟, 赵敏, 薛文艳, 梁思琦, 刘乐, 刘超, 陈云明(4648)

基于Meta-analysis的生物炭对土壤硝态氮淋失和磷酸盐固持影响 ..... 姜志翔, 崔爽, 张鑫, 郝敏, 孙德茂(4658)

低分子有机酸强化植物修复重金属污染土壤的作用与机制 ..... 方治国, 谢俊婷, 杨青, 卢焯桢, 黄海, 朱芸娟, 尹思敏, 吴鑫涛, 都韶婷(4669)

无机钝化剂对镉污染酸性水稻土的修复效果及其机制 ..... 张剑, 孔繁艺, 卢升高(4679)

改良铅锌矿渣对栎树幼苗铅锌富集与耐性机制 ..... 谢天志, 陈永华, 苏荣葵, 刘慧, 姚海松(4687)

CaO<sub>2</sub>/FA复合材料富集磷效能及其回收物对土壤改良作用 ..... 岳薇, 李大鹏, 吴玲予, 王璐, 汤尧禹, 朱企, 黄勇(4697)

早稻秸秆还田和减钾对晚稻产量和土壤肥力的影响 ..... 黄巧义, 黄建凤, 黄旭, 吴永沛, 李苹, 付弘婷, 唐拴虎, 刘一峰, 徐培智(4706)

秸秆连续还田配施化肥对稻-油轮作土壤碳库及作物产量的影响 ..... 蔡影, 付思伟, 张博睿, 胡宏祥, 刘文雯, 俞金涛, 贾临东, 刘运峰(4716)

化肥减量配施秸秆对双季稻田固氮微生物群落的影响 ..... 陈凯鹏, 韦菊娟, 陈丹, 王聪, 沈健林, 李勇, 吴金水(4725)

化肥减量与有机物料添加对华北潮土微生物氮循环功能基因丰度和氮转化遗传潜力的影响 ..... 李胜君, 胡荷, 李刚, 王蕊, 赵建宁, 张贵龙, 修伟明(4735)

长期覆膜条件下农田土壤微生物群落的响应特征 ..... 胡志娥, 肖谋良, 丁济娜, 季剑虹, 陈剑平, 葛体达, 鲁顺保(4745)

长期秸秆还田对潮土真菌群落、酶活性和小麦产量的影响 ..... 马垒, 李燕, 魏建林, 李子双, 周晓琳, 郑福丽, 吴小宾, 王利, 刘兆辉, 谭德水(4755)

土壤改良剂对再生水滴灌根际土壤菌群多样性及病原菌和抗生素抗性基因丰度的影响 ..... 崔丙健, 崔二革, 刘春成, 胡超, 樊向阳, 李中阳, 高峰(4765)

氮素对苜蓿植物修复垃圾堆场镉-多环芳烃复合污染土壤及土壤细菌群落结构的影响 ..... 李怡佳, 马俊伟, 李玉倩, 肖琛, 沈心怡, 牛云, 陈家军(4779)

抗生素降解剂对猪粪堆肥腐熟和细菌群落演替的影响 ..... 李玮琳, 张昕, 马军伟, 孙万春, 成琪璐, 林辉(4789)

《环境科学》征订启事(4337) 《环境科学》征稿简则(4407) 信息(4521, 4705, 4800)

# 乌海市高分辨率大气污染源排放清单构建及其在臭氧污染成因探究中的应用

张瑞欣<sup>1</sup>, 楚波<sup>2</sup>, 尚春林<sup>3</sup>, 曹喜萍<sup>3</sup>, 李光耀<sup>1</sup>, 朱玉凡<sup>1</sup>, 刘晓<sup>1</sup>, 夏佳琦<sup>1</sup>, 陈强<sup>1\*</sup>

(1. 兰州大学大气科学学院, 半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000; 2. 乌海市生态环境局, 乌海 016000; 3. 内蒙古自治区环境监测总站乌海分站, 乌海 016000)

**摘要:** 乌海市是我国典型的煤焦化工业基地, 大气污染物排放总量较大且近年来夏季 O<sub>3</sub> 污染问题逐渐突出, 明确大气污染物排放特征, 探究 O<sub>3</sub> 污染形成机制是客观认识其 O<sub>3</sub> 污染现状, 科学制定污染控制措施的基础. 基于“系数法”采用自下而上的方式构建了 2018 年乌海市高分辨率大气污染源排放清单 (HEI-WH18), 利用 WRF-Chem 对 HEI-WH18 的适用性和准确性进行评估, 并结合模式诊断模块探究了乌海市夏季 O<sub>3</sub> 污染形成的原因. 排放清单结果表明, 2018 年乌海市 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、VOCs、NH<sub>3</sub>、BC 和 OC 的排放总量分别为 65 943、40 934、172 867、159 771、47 469、69 191、1 407、1 491 和 1 648 t·a<sup>-1</sup>. 与 MEIC 清单相比, 利用 HEI-WH18 能更好地捕捉到 O<sub>3</sub> 及其前体物的排放变化规律和量级, 适用于乌海市夏季 O<sub>3</sub> 的模拟及其来源分析研究. 从 O<sub>3</sub> 及前体物的空间分布来看, 乌海市海勃湾城区白天为 O<sub>3</sub> 高值区, 3 个工业园区无论白天和夜间均为 O<sub>3</sub> 低值区和 NO<sub>2</sub> 高值区, CO 的空间分布特征与煤层及矸石堆自燃源一致. 根据对 O<sub>3</sub> 污染过程的诊断分析, 边界层中高层 O<sub>3</sub> 浓度的升高主要是平流输送和化学过程共同作用的结果, 低层 O<sub>3</sub> 浓度的升高是垂直混合和平流输送导致的, 化学过程在低层的贡献较为复杂, 其正贡献起到了维持高 O<sub>3</sub> 浓度的作用, 负贡献结合平流输送造成了 O<sub>3</sub> 污染的最终消散.

**关键词:** 源排放清单; WRF-Chem 模式; 臭氧 (O<sub>3</sub>); 乌海; 污染成因

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)10-4327-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202201072

## Establishment of High-Resolution Emissions Inventory in Wuhai and Its Application in Exploring the Causes of Ozone Pollution

ZHANG Rui-xin<sup>1</sup>, CHU Bo<sup>2</sup>, SHANG Chun-lin<sup>3</sup>, CAO Xi-ping<sup>3</sup>, LI Guang-yao<sup>1</sup>, ZHU Yu-fan<sup>1</sup>, LIU Xiao<sup>1</sup>, XIA Jia-qi<sup>1</sup>, CHEN Qiang<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Wuhai Ecology and Environment Bureau, Wuhai 016000, China; 3. Wuhai Branch of Inner Mongolia Autonomous Region Environmental Monitoring Center Station, Wuhai 016000, China)

**Abstract:** Wuhai is a typical coking industrial base including three industrial parks within its jurisdiction. The emission amount of air pollutants is considerable here, and O<sub>3</sub> pollution has become serious in recent years. Clarifying the air pollutant emission characteristics and exploring the formation mechanism of O<sub>3</sub> are the basis for objectively understanding the O<sub>3</sub> pollution and formulating scientific prevention and control measures. This study established the high-resolution emission inventory of Wuhai in 2018 (HEI-WH18) based on the “coefficient method,” evaluated the applicability and accuracy of HEI-WH18 using the WRF-Chem model, and explored the causes of O<sub>3</sub> pollution in summer using WRF-Chem diagnosis module output. The HEI-WH18 showed that the total emissions amount of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, VOCs, NH<sub>3</sub>, BC, and OC were 65 943, 40 934, 172 867, 159 771, 47 469, 69 191, 1 407, 1 491, and 1 648 t·a<sup>-1</sup>, respectively. HEI-WH18 could capture the variation and magnitude of O<sub>3</sub> and its precursors better than the MEIC, which was suitable for the O<sub>3</sub> simulation and source analysis in summer. From the perspective of spatial distribution, Haibowan was a high-value area of O<sub>3</sub> during the daytime, and the three industrial parks were low-value areas of O<sub>3</sub> and high-value areas of NO<sub>2</sub> during the daytime and nighttime. The spatial distribution characteristics of CO were consistent with the spontaneous combustion of coal and coal gangue sources. According to the diagnostic analysis of two O<sub>3</sub> pollution processes, the O<sub>3</sub> increase in the upper boundary layer was mainly related to the advection transport and chemical process, and it was caused by vertical mixing and the advection transport process in the lower boundary layer. The contribution of the chemical process in the lower boundary layer was complicated, and its positive contribution played a role in maintaining a high O<sub>3</sub> concentration, whereas its negative contribution combined with advection transport resulted in the final dissipation of O<sub>3</sub> pollution.

**Key words:** emissions inventory; WRF-Chem model; ozone (O<sub>3</sub>); Wuhai; cause of pollution formation

大气污染源排放清单不仅可识别污染源、全面掌握污染物排放规律, 也可为大气污染成因探究、减排方案制定和空气质量预报预警等提供重要的基础数据和信息. 目前, 以清华大学开发的中国多尺度排放清单模型 (multi-resolution emission inventory for China, MEIC) 为代表的全国网格化排放清单被广泛应用于空气质量模式的模拟<sup>[1~3]</sup>, 但由于网格分辨率较低, 当其被分配至城市尺度时存在较大不确定

性<sup>[4]</sup>. 在城市尺度大气污染源排放清单方面, 东部地区和重点城市大气污染源清单的研究较为成熟, 但污染源和污染物种类齐全的高时空分辨率城市排放清单仍未完全建立<sup>[5,6]</sup>, 西部地区源排放清单的构建起步相对较晚, 涉及单个源类、污染物或市区

收稿日期: 2022-01-09; 修订日期: 2022-02-22

作者简介: 张瑞欣 (1994~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为臭氧污染成因分析及来源解析, E-mail: zhangrx18@lzu.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: chenqhq@lzu.edu.cn

的本地排放清单建立工作正在逐步开展<sup>[7-9]</sup>. 同时, 城市清单的研究结果具有显著的区域特征, 如珠江三角洲地区以家具制造、石油精炼和油气码头排放为主的工艺过程源是 VOCs 的最大贡献源类<sup>[10]</sup>, 而以机械加工、建筑装饰、电子设备制造、印刷和家具等行业为主的溶剂使用源则是四川省 VOCs 排放的最大贡献源类<sup>[11]</sup>; 山东省 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 的主要来源是以施工扬尘源中建筑物建设和拆迁源为主的扬尘源<sup>[12]</sup>, 东北地区则是以生活民用源和工业源的排放为主<sup>[13]</sup>; 袁相洋等<sup>[14]</sup>估算了 2015 年南京市和北京市森林天然源挥发性有机物 (biogenic volatile organic compounds, BVOCs) 的排放表明, 北京市森林源 VOCs 排放总量是南京的 2~3 倍, 且两市 VOCs 排放优势树种不同. 综上, 由于区域位置、自然条件、社会经济状况、产业结构、生产消费特点、交通和科技发展水平等的差异导致城市清单具有突出的本地特征, 构建符合本地的高分辨率城市清单是实现精准科学治污的重要基础.

乌海市地处内蒙古自治区西南部, 由于区域丰富的煤炭和矿产资源, 煤化工工业为乌海及周边区域的支柱产业, 除辖内的海勃湾千里山、乌达和海南西来峰工业园区外, 乌海市周边还分布着蒙西、乌斯太、棋盘井和石嘴山河滨工业园区, 形成了园区“围城”的工业分布特征. 作为典型煤炭资源型城市的乌海市工业布局特殊, 大气污染物排放总量较大, 虽有部分研究

初步量化了乌海市及周边园区典型行业的排放<sup>[15,16]</sup>, 但系统完善的城市大气污染源排放清单尚未建立, 大气污染物排放强度和时空分布特征尚不清楚. 同时, 近年来乌海市夏季 O<sub>3</sub> 污染问题逐渐突出, 且 O<sub>3</sub> 污染的成因尚未被完全揭示<sup>[17,18]</sup>. 本文以 2018 年为基准年, 对乌海市主要大气污染源进行实地调研, 结合统计调查数据获取乌海市大气污染源活动水平, 利用“系数法”构建了乌海市高时空分辨率大气污染源清单 (self-built high-resolution emission inventory in 2018, HEI-WH2018). 在分析乌海市大气污染源排放特征的基础上, 选取 O<sub>3</sub> 污染严重的 7 月为夏季代表月份, 利用 WRF-Chem (weather research and forecasting model coupled to chemistry) 模式评估了自建清单适用性和准确性, 分析了乌海市 O<sub>3</sub> 及前体物分布特征, 并结合模式诊断模块分析了乌海市 O<sub>3</sub> 污染过程中不同物理化学过程的贡献. 以期为乌海市及其他以煤化工行业为主的工业城市本地精细化源清单的建立及 O<sub>3</sub> 污染成因的探究提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

本次源清单的建立涵盖乌海市下辖的海勃湾区、乌达区和海南区. 乌海市共 3 个国控站点, 分别为聚英学校、林业局和中海勃湾学校 (图 1), 均位于海勃湾区.

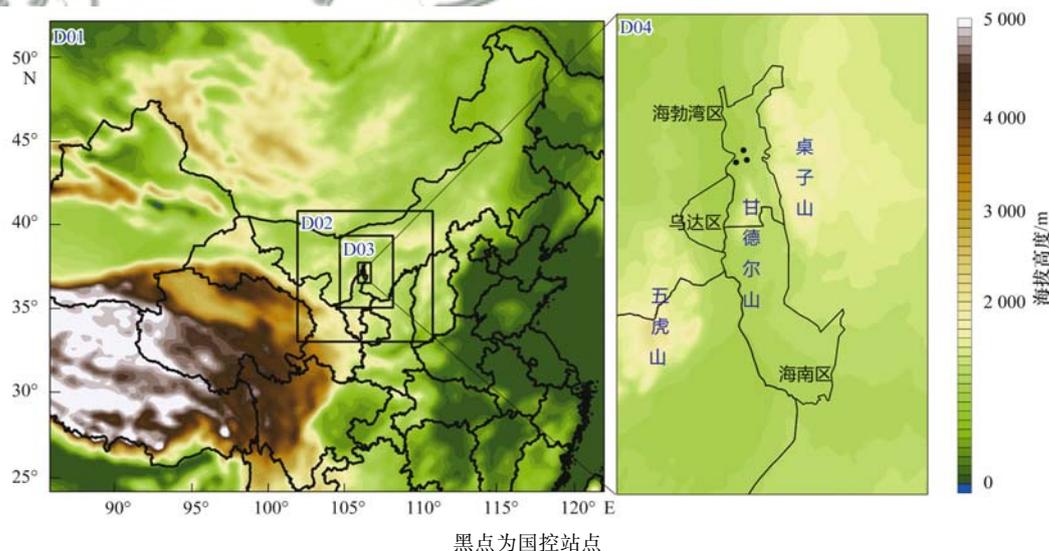


图 1 研究区域及监测站点分布示意

Fig. 1 Modeling domains and location of monitoring stations

### 1.2 排放清单的建立

#### 1.2.1 建立方法及源分类

参考国家生态环境部发布的系列大气污染物排放清单编制技术指南, HEI-WH18 主要利用“系数法”自下而上构建, 包含 12 类污染源, 分别为: 工艺

过程源、化石燃料燃烧源、溶剂使用源、移动源、农牧业氨源、废弃物处理源、扬尘源、油气储运源、生物质燃烧源、煤层及矸石堆自燃源、餐饮源和天然源; 9 种污染物, 分别为: SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO、NH<sub>3</sub>、VOCs、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、BC 和 OC.

### 1.2.2 活动水平和因子选取

煤层及矸石堆自燃源活动性水平依据 2017 年和 2018 年可见光红外成像辐射仪 (visible infrared imaging radiometer, VIIRS) 火点数据确定<sup>[19]</sup>; 天然源排放利用天然源排放模型 (model of emissions of gases and aerosols from nature, MEGAN) 计算得到, 活动水平采用中国科学院地理科学与资源研究所提供的中国 100 万植被类型空间分布数据集 (<https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=122>); 其它各类源的活动性水平数据来源于现场调查、行业报告和乌海市政府公报数据, 结合对乌海市重点行业和企业进行现场核查最终确定。在排放因子选用方面, 各类人为源优先选取国家颁布的排放清单编制指南中的相关因子<sup>[20~27]</sup>, 其次参考文献<sup>[28]</sup>中的因子, 对于以上指南和手册未涵盖的源类如其他工业锅炉、钢材生产、飞机及船舶排放和农田系统氮肥使用等, 依照 11 大类人为源进一步进行排放因子选取, 其中化石燃料燃烧源和工艺过程源参考文献<sup>[29~31]</sup>, 移动源参考文献<sup>[10, 32]</sup>, 溶剂使用源参考文献<sup>[33, 34]</sup>, 农牧业氨源参考文献<sup>[35]</sup>; 煤层及矸石自燃源排放因子选取详见文献<sup>[19]</sup>; 对于仍未涵盖的源类如电石生产、基础化学原料制造、合金生产、非金属和金属制品制造等源类选用文献<sup>[36]</sup>中的排放因子。化石燃料燃烧源中有在线监测数据的企业, 根据在线监测结果对  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  和  $\text{PM}_{10}$  的排放因子进行了本地化校正。

### 1.2.3 时空分配

依据文献<sup>[28]</sup>和各类源活动水平的月变化情况将年排放量细分至各月。煤层及矸石堆自燃源和生物质燃烧源以 VIIRS 火点和土地利用类型进行空间分配; 道路移动源根据乌海市实际路网分布分配, 非道路移动源依据建筑用地面积、耕地面积等分配; 农牧业源以农村居民点以及耕地类型进行分配; 土壤扬尘和道路扬尘分别按照土地利用类型和道路长度、车流量等分配; 餐饮源按照乌海市人口分布特征分配, 除上述源之外的其它源按照排放源所在经纬度进行空间分配; 最终, 利用 Arcgis 将所有污染物排放量整合细分至  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$  的空间网格之上。

### 1.3 模式设置及污染物浓度数据

基于 HEI-WH18, 利用 WRF-Chem 对乌海市 2018 年 7 月  $\text{O}_3$  及其前体物进行模拟。WRF-Chem 采用 4 层嵌套 (图 1), 水平分辨率分别为 27、9、3 和 1 km。WRF 模式输入的气象资料来源于美国国家环境预报中心 (national centers for environmental prediction, NCEP) 提供的 FNL (final operational

global analysis) 全球再分析资料, 空间分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ , 时间间隔为 6 h。化学初始及侧边界条件采用全球化学传输模式 (community atmosphere model with chemistry, CAM-Chem) 的输出结果, 空间分辨率为  $0.9^\circ \times 1.25^\circ$ , 时间间隔为 6 h<sup>[37~39]</sup>。乌海市之外的中国区域源排放清单采用清华大学开发的 2016 年 MEIC 清单 (<http://meicmodel.org>)<sup>[40~43]</sup>; 中国之外区域采用 EPA-US/Canada、MICS-Asia、TNO 和 EDGAR 团队等联合开发的基准年为 2010 年的全球大气污染物排放清单 HTAP\_v2 (hemispheric transport of air pollution version 2)<sup>[44]</sup>, 它已被广泛地应用于全球及区域尺度数值模拟研究中<sup>[45, 46]</sup>。另外, 本研究采用的空气污染物数据来自全国城市空气质量实时发布平台 (<http://106.37.208.233:20035/>) 公布的乌海市国控站点小时浓度数据。

## 2 结果与讨论

### 2.1 乌海市大气污染源排放特征及与 MEIC 的比较

HEI-WH18 中  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、CO、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、VOCs、 $\text{NH}_3$ 、BC 和 OC 的年排放总量分别为 65 945、40 934、172 867、159 771、47 469、69 191、1 407、1 491 和 1 648  $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$  (表 1)。从不同源类的排放及贡献来看,  $\text{SO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、BC 和 OC 排放最大的源类为煤层及矸石堆自燃源, 贡献率分别为: 63%、61%、71%、45% 和 59%;  $\text{NO}_x$  排放较大的为工艺过程源、化石燃料燃烧源和移动源, 贡献率分别为 45%、43% 和 10%; VOCs 和 CO 排放最大的是工艺过程源, 贡献率分别为 82% 和 61%; 废弃物处理源和农牧业氨源的排放对  $\text{NH}_3$  贡献较大, 贡献率分别为 69% 和 18% (表 1 和图 2)。

将 HEI-WH18 与基准年为 2016 年 MEIC 清单进行对比<sup>[11]</sup>, 与 MEIC 年排放总量相比, HEI-WH18 中  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{NH}_3$  和 OC 的年排放总量小 35 927、50 609、1 568、1 303 和 105  $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ , CO、 $\text{PM}_{10}$ 、VOCs 和 BC 的年排放总量大 2 388、31 856、39 667 和 48  $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。进一步细分至子源, 工业部门除  $\text{NH}_3$  年排放量比 MEIC 中的数值小 133  $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$  外, 其他污染物年排放量均比 MEIC 中的数值大, 这可能与 MEIC 对工业企业活动水平数据与排放相关参数的调研缺乏有直接关系<sup>[47]</sup>; 火电企业 VOCs 年排放量较 MEIC 中的数值大 1 363  $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ , 其他污染物年排放量均显著小于 MEIC 的, HEI-WH18 火电企业活动水平根据乌海市火电企业实际燃料用量确定, 同时, 火电企业  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  和  $\text{PM}_{10}$  的排放因子经过在线监测数据校正更符合乌海市实际情况; HEI-WH18 交通部门除  $\text{NH}_3$  年排放量比 MEIC 中的数值

大  $7 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$  外,其余污染物的年排放量均小于 MEIC 的,HEI-WH18 中  $\text{NH}_3$  主要为汽油车和柴油车的排放,且汽油车和柴油车的排放总量在交通部门年排放总量中贡献较大,因此两个清单交通部门排放量的差异可能是由柴油车和汽油车活动水平的差异导致的,另外 HEI-WH18 中考虑了飞机和船舶排放也是造成交通部门排放量差异的原因之一;民用部门  $\text{CO}$ 、 $\text{VOCs}$ 、 $\text{OC}$  和  $\text{NH}_3$  年排放量分别比 MEIC 中的数值小  $25\ 603$ 、 $1\ 581$ 、 $230$  和  $49 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ ,其他污染物均大于 MEIC 的,说明 MEIC 可能低估了民用部门散煤的用量.另外,MEIC 清单未考虑煤层及矸石堆

自燃源、油气储运源和废弃物处理源等源类也是造成两清单存在差异的原因.总的来说,纳入源类的差异、不同数据来源获得的活动水平差异和全国平均与本地实际污染控制水平差异是造成 HEI-WH18 与 MEIC 结果存在差异的主要原因<sup>[48]</sup>.同时 MIEC 清单网格分辨率较低在乌海区域仅包含 4 个网格点,在较小不规则区域总量的提取也会对清单结果有一定的影响,MEIC 清单虽能较好的反映城市总的排放水平,但是当被分配至高分辨率网格时不确定性较大<sup>[4]</sup>,这也进一步说明了构建本地高精度污染源排放清单的必要性.

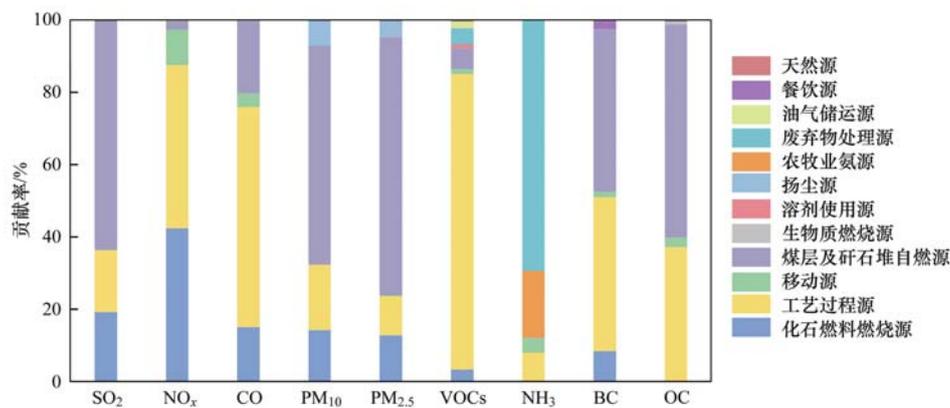


图 2 HEI-WH18 中不同源类排放贡献

Fig. 2 Contribution of various emission sources in HEI-WH18

表 1 2018 年乌海市各类大气污染源排放量及其与 MEIC 清单的对比/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$

Table 1 Emissions of air pollution sources and their comparison with MEIC for Wuhai in 2018/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$

源清单	源分类	$\text{SO}_2$	$\text{NO}_x$	$\text{CO}$	$\text{PM}_{10}$	$\text{PM}_{2.5}$	$\text{VOCs}$	$\text{NH}_3$	BC	OC	
HEI-WH18	化石燃料燃烧源	12 799	17 430	26 374	23 103	6 181	2 469	— <sup>6)</sup>	128	—	
	工艺过程源	11 321	18 507	105 316	28 877	5 160	56 540	115	635	617	
	移动源	6	4 004	6 585	104	95	1 014	56	24	45	
	煤层及矸石堆自燃源	41 817	977	34 390	96 779	33 873	3 899	—	668	969	
	生物质燃烧源	2	16	202	44	43	39	3	1	14	
	溶剂使用源	—	—	—	—	—	738	—	—	—	
	扬尘源	—	—	—	10 802	2 067	—	—	—	—	
	农牧业氨源	—	—	—	—	—	—	260	—	—	
	废弃物处理源	—	—	—	—	—	3 090	973	—	—	
	油气储运源	—	—	—	—	—	1 262	0	—	—	
	餐饮源	—	—	—	62	50	115	—	35	3	
	天然源	—	—	—	—	—	19	—	—	—	
	合计	65 945	40 934	172 867	159 771	47 469	69 191	1 407	1 491	1 648	
	MEIC	工业部门 <sup>1)</sup>	11 986	21 111	104 900	29 030	5 297	56 714	115	642	617
		火电企业 <sup>2)</sup>	3 640	11 572	21 449	933	246	2 027	—	13	—
交通部门 <sup>3)</sup>		6	4 004	6 585	104	95	1 014	56	24	45	
民用部门 <sup>4)</sup>		8 494	3 269	1 443	21 999	5 804	422	3	150	17	
农业部门 <sup>5)</sup>		—	—	—	—	—	—	260	—	—	
合计		24 126	39 956	134 377	52 066	11 442	60 177	434	829	679	
MEIC	工业部门	9 949	14 603	40 904	6 379	4 407	12 404	248	483	480	
	火电企业	45 269	67 618	33 389	12 270	7 420	664	—	15	—	
	交通部门	310	6 843	30 700	277	275	5 439	49	144	57	
	民用部门	4 525	1 500	27 046	1 284	908	2 003	52	139	247	
	农业部门	—	—	—	—	—	—	1 388	—	—	
	合计	60 053	90 565	132 039	20 210	13 010	20 510	1 737	781	784	

1) 包括化石燃料燃烧源中的工业部分和工艺过程源; 2) 包括化石燃料燃烧源中的火电部分; 3) 包括移动源; 4) 包括化石燃料固定燃烧源中的民用部分、生物质燃烧源和餐饮源; 5) 包括农牧业氨源; 6) “—”表示无该类污染物的排放

从不同源类月分配系数看(图3),受到工艺过程和煤层及矽石堆自燃源的影响,夏季(6~8月)SO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>和CO的排放量较大;由于冬季供热采暖化石燃料燃烧源冬季(11~1月)排放较大,因此NO<sub>x</sub>冬季排放量略高于夏季;VOCs、NH<sub>3</sub>、BC和OC各月排放量相差不大,但总的来说夏季略高于冬季.从空间分布特征上来看(图4),在乌海市3个工业园区(千里山、乌达和西来峰工业园区)各污染物排放量较大;其次由于煤层及矽石堆自燃源的影响在海勃湾区西南部、海南区东北部和乌达区西部也存在污染物排放高值;另外,由于海勃湾区和乌达区人口密度较大,受到移动源、化石燃料燃烧源和餐饮源等影响,海勃湾区和乌达城区污染物排放量较大.

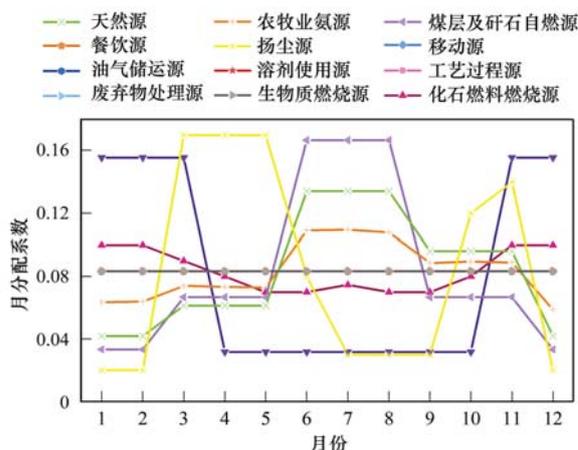


图3 HEI-WH18中各类源月分配系数

Fig. 3 Monthly distribution coefficient of emission sources in HEI-WH18

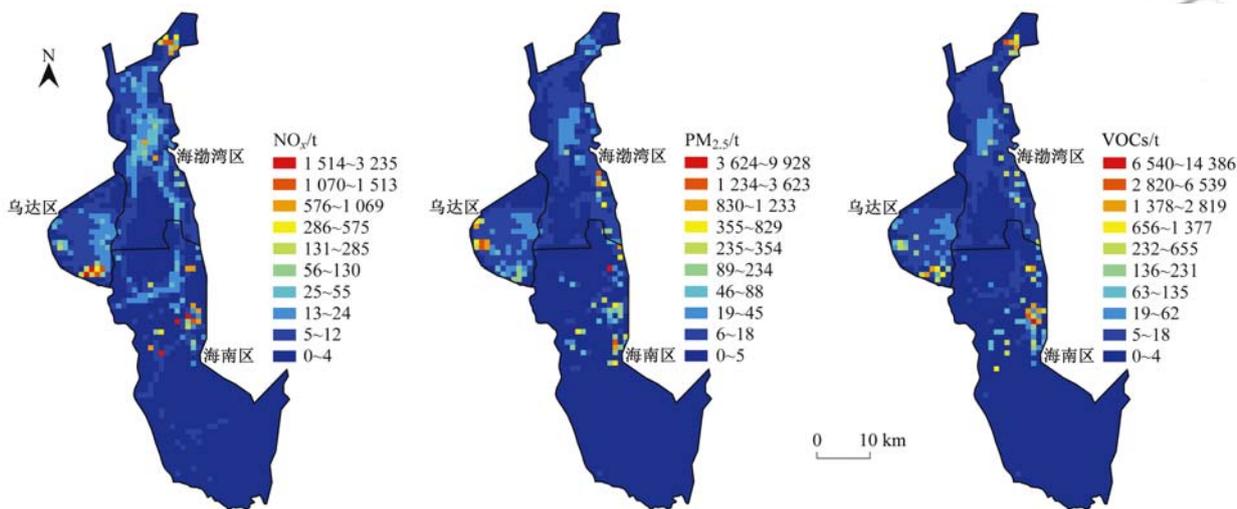


图4 HEI-WH18中NO<sub>x</sub>、VOCs和PM<sub>2.5</sub>的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of annual NO<sub>x</sub>, VOCs, and PM<sub>2.5</sub> emissions

## 2.2 模拟结果评估

采用平均偏差(MB)、平均误差(ME)、均方根误差(RMSE)、皮尔逊相关系数(R)和一致性指数(IOA)对比MEIC和HEI-WH18对乌海市7月国控站点O<sub>3</sub>及其前体物的模拟情况,以定量评估HEI-WH18的适用性和模式模拟效果.其

中,MB、ME和RMSE代表了模式捕捉观测数据量级和大小的能力,与相应评估参数或变量的单位一致,越接近0模拟效果越好;R和IOA代表了模式捕捉观测数据变化的能力,越接近1模拟效果越好<sup>[49]</sup>.7月国控站点各统计参数均值如表2所示.

表2 O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>和CO模拟浓度与监测浓度对比<sup>1)</sup>

Table 2 Statistical comparison between the observed and simulated concentration of O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, and CO

清单	污染物	MB	ME	RMSE	R	IOA
MEIC	NO <sub>2</sub>	44.59	47.56	73.67	0.59	0.38
	O <sub>3</sub>	35.33	59.23	76.69	0.64	0.65
	CO	-0.72	0.72	0.86	0.47	0.43
HEI-WH18	NO <sub>2</sub>	33.89	38.67	58.57	0.54	0.43
	O <sub>3</sub>	21.00	47.69	61.49	0.61	0.70
	CO	-0.49	0.59	0.74	0.46	0.57

1) 单位说明:MB、ME和RMSE为浓度单位,其中NO<sub>2</sub>和O<sub>3</sub>为μg·m<sup>-3</sup>,CO为mg·m<sup>-3</sup>;R和IOA无量纲

从MB上看,MEIC和HEI-WH18均高估了NO<sub>2</sub>和O<sub>3</sub>,低估了CO;HEI-WH18的ME和

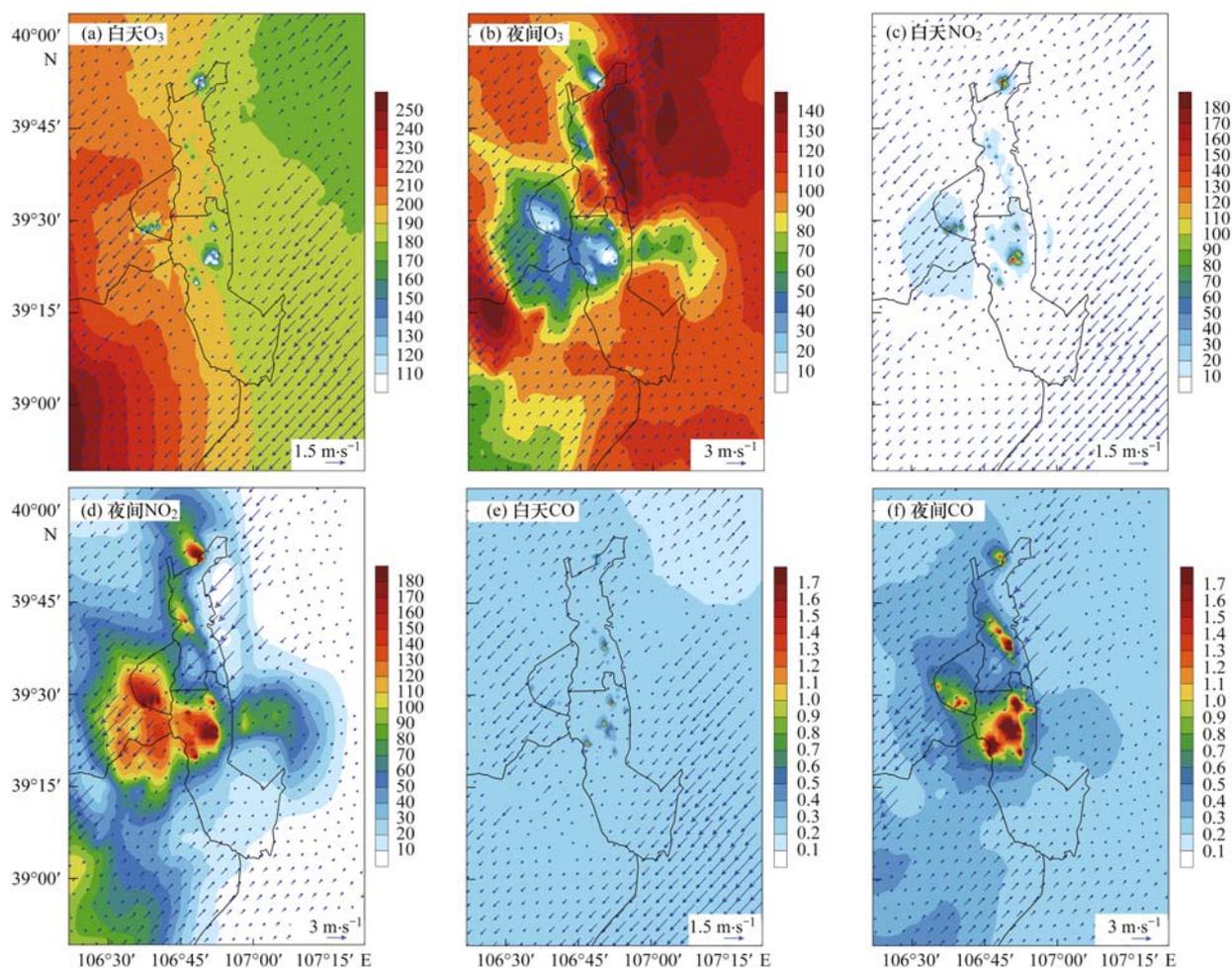
RMSE均显著小于MEIC,HEI-WH18模拟O<sub>3</sub>的MB、ME和RMSE分别比MEIC中的数值小

14.33、11.54 和 15.20  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 这说明相较于 MIEC, HEI-WH18 对  $\text{O}_3$  及其前体物量级的模拟更好; 从  $R$  和 IOA 来看, 两套清单均能较好地再现  $\text{O}_3$  及其前体物的变化, 国控站点  $\text{O}_3$  平均  $R$  分别为 0.64 和 0.61, 与国内外其他研究结果相近<sup>[50~52]</sup>, 但 MEIC 的  $R$  均大于 HEI-WH18, IOA 均小于 HEI-WH18. 因此, 虽两套清单均能捕捉  $\text{O}_3$  及其前体物的变化规律, 但是 HEI-WH18 对于

$\text{O}_3$  及其前体物量级的模拟与监测值更为符合. 同时也说明 MEIC 清单中可能高估了乌海市  $\text{NO}_x$  的排放量, 低估了 CO 的排放量.

### 2.3 乌海市 $\text{O}_3$ 、 $\text{NO}_2$ 及 CO 分布特征

由于乌海市  $\text{O}_3$  呈现“单峰”日变化特征, 结合 HEI-WH18 的模拟结果对夏季乌海市近地面  $\text{O}_3$ 、 $\text{NO}_2$  和 CO 白天 (12:00 ~ 18:00) 和夜间 (00:00 ~ 06:00) 的分布特征进行分析 (图 5).



色柱对应浓度,  $\text{O}_3$  和  $\text{NO}_2$  的单位为  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , CO 的单位为  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$

图 5 乌海市夏季  $\text{O}_3$ 、 $\text{NO}_2$  和 CO 的空间分布特征

Fig. 5 Spatial distribution of  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$ , and CO in summer over Wuhai

白天, 乌海市及其周边区域  $\text{O}_3$  浓度整体较高尤其是乌海市西部及西南部宁夏石嘴山地区,  $\text{O}_3$  浓度在 190 ~ 250  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  左右, 3 个工业园区为  $\text{NO}_2$  和 VOCs 较大排放源 (图 5), 白天为  $\text{NO}_2$  高值区, 最高值可达到 180  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以上, 并在日照充足的情况下发生光化学反应消耗  $\text{O}_3$ , 因此, 园区白天为  $\text{O}_3$  低值区. 从月平均风向上看, 白天宁夏石嘴山地区和海勃湾市区及其周边区域均受西南风控制, 可能存在石嘴山至海南区的  $\text{O}_3$  及其前体物的输送. 夜间, 宁夏北部和乌海东部为  $\text{O}_3$  高值区, 乌达区、海南区、海勃湾城区及工业园区和宁夏石嘴山地区  $\text{NO}_2$  浓度

较高,  $\text{O}_3$  浓度低, 这是由于夜间 NO 的滴定作用造成的. 由于煤层及矸石堆自燃源是乌海市 CO 的主要排放源类, 因此受到煤层及矸石堆自燃源空间分布的影响, CO 昼夜高值中心均位于海勃湾区东南部和海南区北部, 白天由于光化学反应的消耗, CO 浓度较低, 最大值仅为 1.5  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  左右, 夜间  $\rho(\text{CO})$  最大值可以达到 5  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . 另外, 由于受到东北风影响, 夜间乌达-海南区的污染物向西南方向传输, 导致乌海西部形成了一个显著的  $\text{O}_3$  低值区, CO 和  $\text{NO}_2$  高值区; 石嘴山地区受到西南风的影响, 低  $\text{O}_3$  和高  $\text{NO}_2$  也向乌海市西南部输送.

## 2.4 乌海市臭氧污染过程分析

选取2018年7月3~5日(P1时段)和7月16~21日(P2时段)两个O<sub>3</sub>污染时段进一步探究乌海市O<sub>3</sub>污染形成的原因,分析区域输送、边界层扩散和化学反应等对污染物浓度变化的影响. WRF-Chem诊断工具的主要物理化学过程有:垂直(adzv)和水平(advh)平流输送过程,垂直和水平平流过程共同作用为平流输送过程(adv = advz + advh);由动力学和热力学效应引起的对流过程(conv),在两次污染过程中贡献均很小,可忽略不计;由垂直浓度梯度引起的垂直混合过程(vmix,在最低层包含干沉降的贡献)和由化学反应导致的化学过程(chem)<sup>[53,54]</sup>.

图6为P1和P2时段08:00~20:00各物理化学过程在不同高度上对O<sub>3</sub>小时浓度的贡献. P1时段,低层(0~150 m)chem均消耗O<sub>3</sub>,7月3~4日负贡献较为显著,小时最大负贡献可以达到96%;7

月5日chem对O<sub>3</sub>的消耗主要集中在18:00~20:00,小时负贡献在52%~81%之间,无论昼夜7月5日chem对O<sub>3</sub>的消耗均较弱,这可能是由于该日乌海市为阴天导致O<sub>3</sub>的化学消耗减弱;7月3~5日低层O<sub>3</sub>的来源主要为vmix,12:00~18:00正贡献平均值分别为62.4、38.1和20 μg·(m<sup>3</sup>·h)<sup>-1</sup>(表3),vmix在500 m高度上为O<sub>3</sub>的主要消耗过程,负贡献平均值分别为-19.3、-6.5和-17.9 μg·(m<sup>3</sup>·h)<sup>-1</sup>,在1000 m高度上也有一定负贡献,这也进一步说明了P1时段来自中高层的垂直混合是低层O<sub>3</sub>的主要来源.从1000~2000 m高度上O<sub>3</sub>的小时变化来看,chem是边界层中高层O<sub>3</sub>的主要来源之一,7月3日和7月5日12:00~18:00 chem的平均贡献值均大于10 μg·(m<sup>3</sup>·h)<sup>-1</sup>,7月4日chem平均贡献值为1.2~3.3 μg·(m<sup>3</sup>·h)<sup>-1</sup>左右;adv在1500~2000 m高度上既是O<sub>3</sub>的主要汇也是O<sub>3</sub>的来源之一.

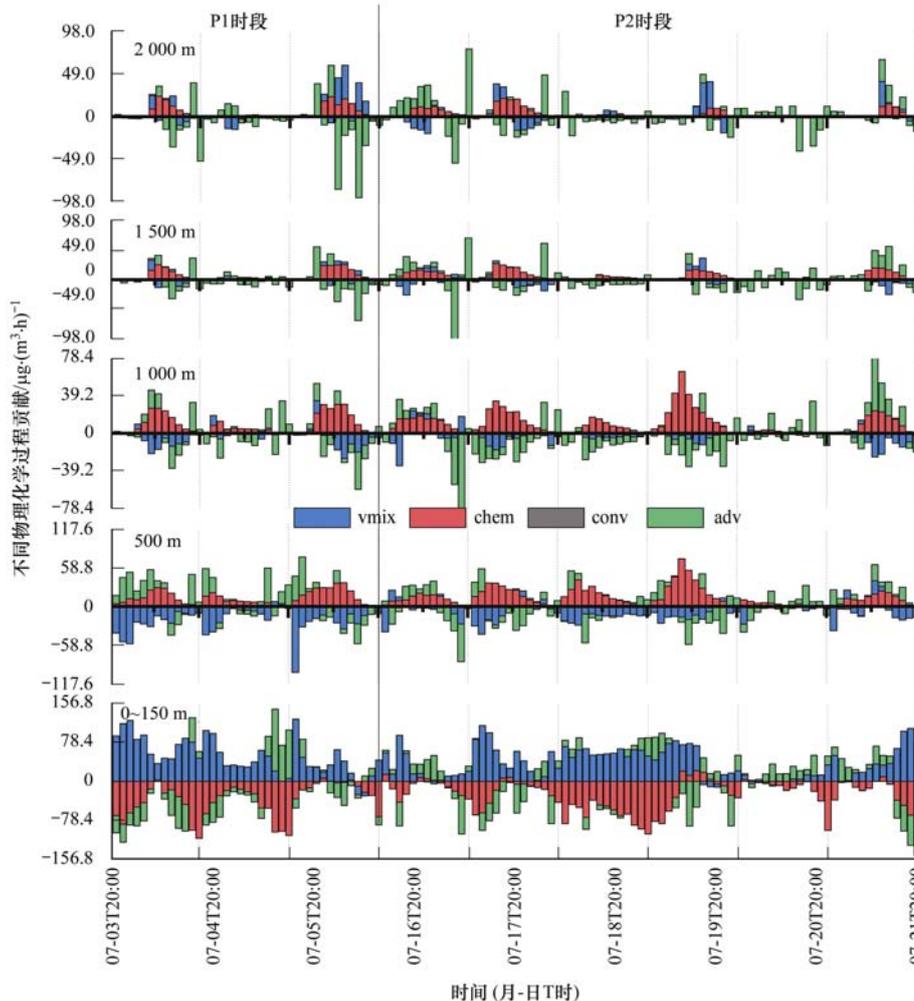


图6 各物理化学过程在不同高度上对O<sub>3</sub>小时浓度的贡献

Fig. 6 Contribution of various physical and chemical processes to the hourly O<sub>3</sub> concentration at different heights

P2时段的污染可以分为两个阶段. 第一阶段,7月16日整个边界层内在中午及午后adv均有较

大正贡献,使得乌海市O<sub>3</sub>浓度整体升高,同时chem在不同高度上进一步促进了O<sub>3</sub>的生成;7月

17~19日边界层中高层 chem 造成  $O_3$  浓度的积累并通过 vmix 向低层传输, 500~2 000 m 高度上 chem 的正贡献平均值在  $8.5 \sim 16.7 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$  之间, vmix 的负贡献平均值为  $-0.2 \sim -13.1 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ ; 低层 vmix 正贡献平均值在  $6.0 \sim 57.2 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$  之间; 另外, 7月19日低层 chem 也起到维持  $O_3$  浓度的作用, 12:00~18:00 平均贡献值为  $8.6 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ . 第二阶段, 7月

20日 adv 的贡献与7月16日正午及午后相似导致整个边界层内  $O_3$  的升高, 尤其在低层正贡献平均值为  $22.9 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ , chem 为低层  $O_3$  主要的汇; 7月21日 chem 和 adv 共同作用使边界层中高层  $O_3$  浓度升高并通过 vmix 向低层输送, 输送至低层后一部分通过 adv 向周边扩散, 一部分通过 chem 消耗, 使  $O_3$  浓度在7月21日下午之后逐渐降低.

表3 12:00~18:00各物理化学过程在不同高度的平均贡献/ $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$

Table 3 Average contribution of various physical and chemical processes at different heights from 12:00 to 18:00/ $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$

日期(月-日)	物理化学过程	0~150 m	500 m	1 000 m	1 500 m	2 000 m
07-03	vmix	62.4	-19.3	-12.1	-1.2	1.3
	adv	-32.9	5.2	0.0	-5.4	-6.9
	chem	-24.9	18.3	16.9	12.4	10.8
07-04	vmix	38.1	-6.5	-0.7	0.1	-2.6
	adv	14.8	3.9	-3.8	-4.4	-2.3
	chem	-40.9	5.4	3.3	2.0	-1.2
07-05	vmix	20.0	-17.9	-13.0	1.4	16.3
	adv	-14.3	-10.1	-12.1	-21.3	-30.8
	chem	-4.0	23.6	21.2	17.8	14.3
07-16	vmix	6.0	-3.5	0.0	1.7	-6.4
	adv	18.4	0.6	-5.1	-13.3	-1.1
	chem	-3.4	14.8	13.3	11.4	8.5
07-17	vmix	25.9	-0.2	-4.2	-8.5	-6.4
	adv	-9.0	-11.8	-5.2	2.3	-2.0
	chem	-5.0	16.7	14.9	13.4	12.5
07-18	vmix	57.2	-13.1	-3.9	-0.6	1.0
	adv	-0.6	-1.5	-8.1	-7.7	-4.1
	chem	-60.1	14.2	9.5	4.6	1.5
07-19	vmix	22.7	-10.2	-5.2	2.3	8.3
	adv	-17.3	-16.5	-15.2	-4.3	-1.3
	chem	8.6	33.3	27.0	11.2	4.0
07-20	vmix	4.3	-2.8	-0.2	0.2	-0.1
	adv	22.9	8.2	7.7	1.6	-6.4
	chem	-10.9	2.3	1.4	0.7	0.1
07-21	vmix	43.9	-4.1	-11.6	-6.9	4.5
	adv	-1.4	9.9	18.0	13.8	6.9
	chem	-16.7	16.0	16.6	13.0	6.2

在两个污染过程中 chem 在低层对  $O_3$  均为负贡献, 进一步结合模式结果分析消耗  $O_3$  的具体反应可知,  $O_3$  的主要消耗路径为:  $O_3$  与 NO 的反应 ( $O_3 + \text{NO} \longrightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$ ) 和  $O_3$  的光解 ( $O_3 + h\nu \longrightarrow \text{O} + \text{O}_2$ ;  $O_3 + h\nu \longrightarrow \text{O}^1\text{D} + \text{O}_2$ ) 两条路径. P1 时段  $O_3$  与 NO 的反应和  $O_3$  的光解在 08:00~20:00 的平均贡献率为 75.39% 和 23.70%, P2 时段为 67.42% 和 31.63%. NO 的滴定作用对两个污染过程中低层  $O_3$  的消耗均有显著贡献, 在  $O_3$  的光解中生成 O 的反应占有绝对优势.

### 3 结论

(1) 利用“系数法”自下而上构建了乌海市 2018 年大气污染源排放清单. 2018 年乌海市  $\text{SO}_2$ 、

$\text{NO}_x$ 、CO、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、VOCs、 $\text{NH}_3$ 、BC 和 OC 的排放总量分别为 65 943、40 934、172 867、159 771、47 469、69 191、1 407、1 491 和 1 648  $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ .

(2) 利用 HEI-WH18 能更好地捕捉  $O_3$  及其前体物的变化规律和量级, 适用于乌海市夏季  $O_3$  的模拟及其来源分析研究; 从污染物的分布看, 海勃湾城区白天为  $O_3$  高值区, 夜间电厂附近为  $O_3$  低值区, 工业园区无论白天和夜间均为  $O_3$  低值区和  $\text{NO}_2$  高值区, CO 的空间分布特征与煤层及矸石堆自燃源较为一致.

(3) 结合两个  $O_3$  污染过程分析了不同物理化学过程对乌海市夏季  $O_3$  污染的影响, P1 时段平流输送和化学反应导致边界层中高层  $O_3$  浓度升高, 并经由垂直混合向低层传输, 最终  $O_3$  在低层通过化学

反应逐渐消耗. P2 时段  $O_3$  污染的形成可以分为两个阶段, 第一阶段整个边界层内的平流输送使得区域整体  $O_3$  浓度升高, 化学反应在中高层进一步促进了  $O_3$  积累并通过垂直混合向低层传输, 低层化学反应起到维持  $O_3$  高浓度的作用; 第二阶段  $O_3$  升高的原因与第一阶段相同, 后低层化学反应和平流输送共同作用导致了  $O_3$  污染的消散.

#### 参考文献:

- [1] Chen D, Liu Z Q, Ban J M, *et al.* Retrospective analysis of 2015-2017 wintertime  $PM_{2.5}$  in China: response to emission regulations and the role of meteorology [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(11): 7409-7427.
- [2] Zhou G Q, Xu J M, Xie Y, *et al.* Numerical air quality forecasting over eastern China: an operational application of WRF-Chem [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **153**: 94-108.
- [3] Hu J L, Chen J J, Ying Q, *et al.* One-year simulation of ozone and particulate matter in China using WRF/CMAQ modeling system [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(16): 10333-10350.
- [4] 郭文凯, 李光耀, 陈冰, 等. 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 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 634-642.  
Guo W K, Li G Y, Chen B, *et al.* Establishment of a high-resolution anthropogenic emission inventory and its evaluation using the WRF-Chem model for Lanzhou [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 634-642.
- [5] 程龙, 郭秀锐, 程水源, 等. 京津冀农业源氨排放对  $PM_{2.5}$  的影响 [J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(4): 1579-1588.  
Cheng L, Guo X R, Cheng S Y, *et al.* Effect of ammonia emission from agriculture in Beijing-Tianjin-Hebei on  $PM_{2.5}$  [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(4): 1579-1588.
- [6] 薛志钢, 杜谨宏, 任岩军, 等. 我国大气污染源排放清单发展历程和对策建议 [J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(10): 1678-1686.  
Xue Z G, Du J H, Ren Y J, *et al.* Development course and suggestion of air pollutant emission inventory in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(10): 1678-1686.
- [7] 闫东杰, 李臻阳, 玉亚, 等. 西安市二氧化硫排放清单及对  $PM_{2.5}$  的贡献 [J]. *安全与环境学报*, 2018, **18**(5): 2002-2007.  
Yan D J, Li Z Y, Yu Y, *et al.* Inventory of  $SO_2$  emission in Xi'an and its contribution to the  $PM_{2.5}$  of the municipality area [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, **18**(5): 2002-2007.
- [8] 刘博薇, 王宝庆, 牛宏宏, 等. 乌鲁木齐市固定燃烧点源大气污染物排放清单 [J]. *环境污染与防治*, 2019, **41**(7): 748-752, 757.  
Liu B W, Wang B Q, Niu H H, *et al.* Atmospheric pollutant emission inventory from stationary combustion point source in Urumqi City [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, **41**(7): 748-752, 757.
- [9] 高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 等. 西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(12): 5585-5593.  
Gao Y Z, Ji Y Q, Lin Z, *et al.* Pollutant emission inventory of biomass combustion sources in Xining City [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(12): 5585-5593.
- [10] 杨柳林, 曾武涛, 张永波, 等. 珠江三角洲大气排放源清单与时空分配模型建立 [J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(12): 3521-3534.  
Yang L L, Zeng W T, Zhang Y B, *et al.* Establishment of emission inventory and spatial-temporal allocation model for air pollutant sources in the Pearl River Delta region [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(12): 3521-3534.
- [11] 周子航, 邓也, 谭钦文, 等. 四川省人为源大气污染物排放清单及特征 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5344-5358.  
Zhou Z H, Deng Y, Tan Q W, *et al.* Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in the Sichuan Province [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5344-5358.
- [12] 江沛玉, 陈晓玲, 李玲玉. 山东省高分辨率大气颗粒物排放清单 [J]. *环境污染与防治*, 2021, **43**(9): 1124-1132.  
Jiang P Y, Chen X L, Li L Y. High-resolution emission inventory of atmospheric particulate matter in Shandong [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2021, **43**(9): 1124-1132.
- [13] 张萌铎, 陈卫卫, 高超, 等. 东北地区大气污染源排放时空特征: 基于国内外清单的对比分析 [J]. *地理科学*, 2020, **40**(11): 1940-1948.  
Zhang M D, Chen W W, Gao C, *et al.* Spatio-temporality of anthropogenic air pollutants in Northeast China based on current emission inventories [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, **40**(11): 1940-1948.
- [14] 袁相洋, 许燕, 杜英东, 等. 南京和北京城市天然源挥发性有机物 (BVOCs) 排放差异 [J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(4): 1489-1500.  
Yuan X Y, Xu Y, Du Y D, *et al.* Differences of biogenic volatile organic compound (BVOC) emissions from urban forests in Nanjing and Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(4): 1489-1500.
- [15] 刘永乐. 煤炭深加工产业集群对乌海市臭氧污染的数值模拟研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2020.  
Liu Y L. The effects of industrial cluster of coal deep processing on ozone pollution in Wuhai based on numerical simulation [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.
- [16] 舒璐. 基于 CMAQ 模型焦化行业对乌海市空气质量影响的研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2020.  
Shu L. Research on the impact of coking industry on air quality in Wuhai City based on CMAQ model [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.
- [17] 张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 等. 乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4180-4190.  
Zhang R X, Chen Q, Xia J Q, *et al.* Exploring characteristics and causes of summer ozone pollution based on process analysis in Wuhai [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4180-4190.
- [18] 李光耀, 陈强, 郭文凯, 等. 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 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 616-623.  
Li G Y, Chen Q, Guo W K, *et al.* Nonlinear response characteristics and control scheme for ozone and its precursors based on orthogonal experimental methods [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 616-623.
- [19] Guo W K, Chen B, Li G Y, *et al.* Ambient  $PM_{2.5}$  and related health impacts of spontaneous combustion of coal and coal gangue [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **55**(9): 5763-5771.
- [20] 环境保护部. 大气细颗粒物一次源排放清单编制技术指南 (试行) [EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/>

- 201408/W020140828351293619540.pdf, 2014-08-20.
- [21] 环境保护部. 大气挥发性有机物源排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/W020140828351293705457.pdf>, 2014-08-20.
- [22] 环境保护部. 大气氨源排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/W020140828351293771578.pdf>, 2014-08-20.
- [23] 环境保护部. 大气可吸入颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594587771088.pdf>, 2014-12-31.
- [24] 环境保护部. 扬尘源颗粒物排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594588131490.pdf>, 2014-12-31.
- [25] 环境保护部. 道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594587831090.pdf>, 2014-12-31.
- [26] 环境保护部. 非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594587960717.pdf>, 2014-12-31.
- [27] 环境保护部. 生物质燃烧源大气污染物排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594588071383.pdf>, 2014-12-31.
- [28] 贺克斌. 城市大气污染源排放清单编制技术手册[EB/OL]. <https://max.book118.com/html/2018/11/16/8107025055001133.shtm>, 2018-11-16.
- [29] 赵斌, 马建中. 天津市大气污染源排放清单的建立[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(2): 368-375.  
Zhao B, Ma J Z. Development of an air pollutant emission inventory for Tianjin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, **28**(2): 368-375.
- [30] Zhang Q, Streets D G, He K B, *et al.* NO<sub>x</sub> emission trends for China, 1995-2004: the view from the ground and the view from space[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, **112**(D22), doi: 10.1029/2007JD008684.
- [31] Zhao Y, Nielsen C P, McElroy M B, *et al.* CO emissions in China: uncertainties and implications of improved energy efficiency and emission control[J]. Atmospheric Environment, 2012, **49**: 103-113.
- [32] 伏晴艳. 上海市空气污染排放清单及大气中高浓度细颗粒物的形成机制[D]. 上海: 复旦大学, 2009.  
Fu Q Y. Emission inventory and the formation mechanism of high pollution of fine particulate matters in Shanghai[D]. Shanghai: Fudan University, 2009.
- [33] 杨利娟, 黄萍, 赵建国, 等. 我国印刷业 VOCs 污染状况与控制对策[J]. 包装工程, 2012, **33**(3): 125-131.  
Yang L X, Huang P, Zhao J G, *et al.* Current status and control strategies of VOC emission from printing industry[J]. Packaging Engineering, 2012, **33**(3): 125-131.
- [34] 陈颖, 叶代启, 刘秀珍, 等. 我国工业源 VOCs 排放的源头追踪和行业特征研究[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(1): 48-55.  
Chen Y, Ye D Q, Liu X Z, *et al.* Source tracing and characteristics of industrial VOCs emissions in China[J]. China Environmental Science, 2012, **32**(1): 48-55.
- [35] 栗世学, 郭文凯, 何昕, 等. 兰州市农牧业源氨排放清单及其时空分布特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1172-1178.  
Li S X, Guo W K, He X, *et al.* Inventory and spatiotemporal distribution of ammonia emission from agriculture and animal husbandry in Lanzhou City[J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1172-1178.
- [36] United States Environmental Protection Agency. AP- 42; compilation of air emissions factors[EB/OL]. <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors>, 2021-02-04.
- [37] Tilmes S, Lamarque J F, Emmons L K, *et al.* Description and evaluation of tropospheric chemistry and aerosols in the Community Earth System Model (CESM1.2)[J]. Geoscientific Model Development, 2015, **8**(5): 1395-1426.
- [38] Danabasoglu G, Lamarque J F, Bacmeister J, *et al.* The community earth system model version 2 (CESM2)[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2020, **12**(2), doi: 10.1029/2019ms001916.
- [39] Emmons L K, Schwantes R H, Orlando J J, *et al.* The chemistry mechanism in the community earth system model version 2 (CESM2)[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2020, **12**(4), doi: 10.1029/2019ms001882.
- [40] Li M, Liu H, Geng G N, *et al.* Anthropogenic emission inventories in China: a review[J]. National Science Review, 2017, **4**(6): 834-866.
- [41] Zheng B, Tong D, Li M, *et al.* Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18**(19): 14095-14111.
- [42] 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.
- [43] Li M, Zhang Q, Zheng B, *et al.* Persistent growth of anthropogenic non-methane volatile organic compound (NMVOC) emissions in China during 1990-2017: drivers, speciation and ozone formation potential[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, **19**(13): 8897-8913.
- [44] Janssens-Maenhout G, Crippa M, Guizzardi D, *et al.* HTAP\_v2. 2: a mosaic of regional and global emission grid maps for 2008 and 2010 to study hemispheric transport of air pollution[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(19): 11411-11432.
- [45] Beegum S N, Gherboudj I, Chaouch N, *et al.* Simulating aerosols over Arabian peninsula with CHIMERE: sensitivity to soil, surface parameters and anthropogenic emission inventories[J]. Atmospheric Environment, 2016, **128**: 185-197.
- [46] Mues A, Lauer A, Lupascu A, *et al.* WRF and WRF-Chem v3. 5.1 simulations of meteorology and black carbon concentrations in the Kathmandu Valley[J]. Geoscientific Model Development, 2018, **11**(6): 2067-2091.
- [47] 王文鹏, 王占祥, 李继祥, 等. 兰-白城市群主要大气污染物网格化排放清单及来源贡献[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1315-1327.  
Wang W P, Wang Z X, Li J X, *et al.* Gridded emission inventories of major criteria air pollutants and source contributions in Lan-Bai Metropolitan Area, Northwest China[J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1315-1327.
- [48] 周亚端. 江苏省高精度大气污染物排放清单的建立及空气质量模拟评估[D]. 南京: 南京大学, 2016.  
Zhou Y D. Establishment of a high-resolution emission inventory and its evaluation through air quality modeling for Jiangsu Province, China[D]. Nanjing: Nanjing University, 2016.
- [49] Huang L, Zhu Y H, Zhai H H, *et al.* Recommendations on benchmarks for numerical air quality model applications in China-Part 1: PM<sub>2.5</sub> and chemical species[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2021, **21**(4): 2725-2743.
- [50] Sharma S, Sharma P, Khare M. Photo-chemical transport

- modelling of tropospheric ozone: a review [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **159**: 34-54.
- [51] Han X, Zhu L Y, Wang S L, *et al.* Modeling study of impacts on surface ozone of regional transport and emissions reductions over North China Plain in summer 2015 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(16): 12207-12221.
- [52] Liu H, Liu S, Xue B R, *et al.* Ground-level ozone pollution and its health impacts in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **173**: 223-230.
- [53] Gao J H, Zhu B, Xiao H, *et al.* A case study of surface ozone source apportionment during a high concentration episode, under frequent shifting wind conditions over the Yangtze River Delta, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **544**: 853-863.
- [54] Gao J, Zhu B, Xiao H, *et al.* Diurnal variations and source apportionment of ozone at the summit of Mount Huang, a rural site in Eastern China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **222**: 513-522.

## 欢迎订阅 2023 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发刊,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如工程索引 Ei Compendex;医学索引 MEDLINE; Scopus; 化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA); Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA): Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS);Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;E-mail:hjkk@rcees.ac.cn;网址:www.hjkk.ac.cn

## CONTENTS

Regionalization and Analysis of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> Synergetic Prevention and Control Areas Based on Remote Sensing Data .....	LI Shen-xin, ZOU Bin, ZHANG Feng-ying, <i>et al.</i> (4293)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in Guangzhou in Winter .....	PEI Cheng-lei, XIE Yu-tong, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4305)
Establishment and Application of Foshan Ozone Concentration Forecast Equation .....	CHEN Chen, HONG Ying-ying, TAN Hao-bo, <i>et al.</i> (4316)
Establishment of High-Resolution Emissions Inventory in Wuhan and Its Application in Exploring the Causes of Ozone Pollution .....	ZHANG Rui-xin, CHU Bo, SHANG Chun-lin, <i>et al.</i> (4327)
Investigating the Pollutants of Marine Shipping Emissions Along the East China Sea by Combining in-situ Measurements and Automatic Identification System .....	..... QIU Hao, LIU Dan-tong, WU Yang-zhou, <i>et al.</i> (4338)
Chemical Component of Particulate Matters and VOCs Characteristics During Vehicle Brake Processes .....	MEN Zheng-yu, LIU Du-you, GUO Quan-you, <i>et al.</i> (4348)
Characterization of VOCs Emissions from Caged Broiler House in Winter .....	CAO Tian-tian, ZHENG Yun-hao, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (4357)
Concentrations and Community Structures of Culturable Bacteria in Aerosols of Household Garbage Stations in Shanghai .....	LU Bing-jie, ZHANG Xiang, WANG Chuan, <i>et al.</i> (4367)
Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emissions in Zhejiang Province from 2008 to 2018 .....	FANG Li-jiang, YANG Yi-qun, YE Guan-qiong (4380)
Roadmap of Coal Control and Carbon Reduction in the Steel Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target .....	XUE Ying-lan, ZHANG Jing, LIU Yu, <i>et al.</i> (4392)
Carbon Emission Reduction Effect of Spatial Correlation Network Structure Characteristics: From the Perspective of Urban Agglomeration .....	ZHENG Hang, YE A-zhong (4401)
Pollution and Carbon Reduction Effect of OFDI in China and Its Mechanism .....	BAI Zi-han, LÜ Lian-hong, ZHAO Ming-xuan, <i>et al.</i> (4408)
Variation Characteristics of Surface Water Quality in China in Recent Years .....	JI Xiao-yan, HOU Huan-huan, WANG Shan-shan, <i>et al.</i> (4419)
Distribution, Risk, and Influencing Factors of Microplastics in Surface Water of Huangshui River Basin .....	FAN Meng-yuan, HUANG Yi-mei, ZHANG Hai-xin, <i>et al.</i> (4430)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Surface Water of the Fenhe River Basin and Influence Factors .....	ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, WANG Zhi-heng, <i>et al.</i> (4440)
Characteristics and Causes of High-manganese Groundwater in Pearl River Delta During Urbanization .....	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (4449)
Characteristics and Causes of Groundwater Salinization in the Plain Area of the Lower Kashgar River .....	LU Han, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (4459)
Sources and Biogeochemical Processes of Nitrate in the Laolongdong Karst Underground River Basin, Chongqing .....	WANG Yu-yang, YANG Ping-heng, ZHANG Jie-ru (4470)
Succession Pattern and Consequences of the Dominant Species During Cyanobacterial Bloom and Its Influencing Factors .....	OUYANG Tian, ZHAO Lu, Ji Lu-lu, <i>et al.</i> (4480)
Structural Characteristics of Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Group of Drinking Water Reservoirs by Water Transmission from Modaomen Waterway in Zhuhai .....	ZHANG Mo-li, WANG En-rui, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (4489)
Effects of Nutrients on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and Bacteria in the Phycosphere .....	LÜ Ping, LI Hui-li, XU Yong, <i>et al.</i> (4502)
Effect of Aging on Adsorption of Tetracycline by Microplastics and the Mechanisms .....	WANG Lin, WANG Shu-xin, ZENG Xiang-ying, <i>et al.</i> (4511)
Effect of Colloids in Sediment and Soil on Their Sorption Behavior of Chloramphenicol .....	YAN Cai-xia, LUO Yan-qing, NIE Ming-hua, <i>et al.</i> (4522)
Historical Antibiotic Stress Changed the Effects of Sulfamethoxazole and Trimethoprim on Activated Sludge; ARGs and Potential Hosts .....	..... ZHANG Zhong-xing, FAN Xiao-yan, LI Xing, <i>et al.</i> (4536)
Spatial Distribution and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-Zinc Mining Area, Yangshuo .....	CHEN Meng, PAN Yong-xing, HUANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4545)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Baiyangdian Lake .....	ZHENG Fei, GUO Xin, TANG Ming-yang, <i>et al.</i> (4556)
Spatial Differentiation and Influencing Factor Analysis of Soil Heavy Metal Content at Town Level Based on Geographic Detector .....	GONG Cang, WANG Liang, WANG Shun-xiang, <i>et al.</i> (4566)
Heavy Metal Emissions from Coal-fired Power Plants and Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risks in Surrounding Soils .....	..... CHE Kai, CHEN Chong-ming, ZHENG Qing-yu, <i>et al.</i> (4578)
Enrichment Factors, Health Risk, and Source Identification of Heavy Metals in Agricultural Soils in Semi-arid Region of Hainan Island .....	..... YANG Jian-zhou, GONG Jing-jing, WANG Zhen-liang, <i>et al.</i> (4590)
Speciation and Pollution Assessment of Heavy Metals in Mangrove Surface Sediments in Jiulong River Estuary .....	ZHANG Hua-lan, YU Rui-lian, WAN Rui-an, <i>et al.</i> (4601)
Status of Heavy Metal in Organic Fertilizers in Main Tea Growing Regions of China .....	YI Xiao-yun, FANG Li, YANG Xiang-de, <i>et al.</i> (4613)
Accumulation Characteristics and Sources of PAEs in Agricultural Soils in Gansu Province .....	CHEN Yu-yu, ZHANG Guang-quan, ZHANG Yang, <i>et al.</i> (4622)
Distribution Characteristics of Soil Phosphorus Forms and Phosphatase Activity at Different Altitudes in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone in Pengxi River, Three Gorges Reservoir .....	..... GAO Yi-lun, FANG Fang, TANG Zi-chao, <i>et al.</i> (4630)
Characteristics of Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Other Soil Physical and Chemical Factors in Cotton Fields with Different Continuous Cropping Years in the Oasis on the Northern Edge of Tarim Basin .....	LI Xin-zhu, GONG Lu, TANG Jun-hu, <i>et al.</i> (4639)
Response of Soil Respiration Rates to Soil Temperature and Moisture at Different Soil Depths of <i>Caragana korshinskii</i> Plantation in the Loess-Hilly Region .....	..... SUN Ya-rong, WANG Ya-juan, ZHAO Min, <i>et al.</i> (4648)
Influence of Biochar Application on Soil Nitrate Leaching and Phosphate Retention: A Synthetic Meta-analysis .....	JIANG Zhi-xiang, CUI Shuang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4658)
Role and Mechanism of Low Molecular-Weight-Organic Acids in Enhanced Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soil .....	FANG Zhi-guo, XIE Jun-ting, YANG Qing, <i>et al.</i> (4669)
Remediation Effect and Mechanism of Inorganic Passivators on Cadmium Contaminated Acidic Paddy Soil .....	ZHANG Jian, KONG Fan-yi, LU Sheng-gao (4679)
Mechanism of Lead-zinc Enrichment and Resistance of Spent Mushroom Compost to Lead-Zinc Slag in <i>Koeleruteria paniculata</i> .....	XIE Tian-zhi, CHEN Yong-hua, SU Rong-kui, <i>et al.</i> (4687)
Phosphorus Enrichment Efficiency of CaO <sub>2</sub> @FA Composites and the Effect of Its Recovered Material on Soil Improvement .....	YUE Wei, LI Da-peng, WU Ling-yu, <i>et al.</i> (4697)
Effects of Early Rice Straw Returning with Reducing Potassium Fertilizer on Late Rice Yield and Soil Fertility .....	HUANG Qiao-yi, HUANG Jian-feng, HUANG Xu, <i>et al.</i> (4706)
Effects of Continuous Straw Returning with Chemical Fertilizer on the Carbon Pool and Crop Yield of Rice-Rape Rotation Soils .....	CAI Ying, FU Si-wei, ZHANG Bo-rui, <i>et al.</i> (4716)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Combined with Straw Application on Diazotrophic Communities in a Double Rice Cropping System .....	..... CHEN Kai-peng, WEI Ju-xian, CHEN Dan, <i>et al.</i> (4725)
Impacts of Co-application of Chemical Fertilizer Reduction and Organic Material Amendment on Fluvo-aquic Soil Microbial N-cycling Functional Gene Abundances and N-converting Genetic Potentials in Northern China .....	LI Sheng-jun, HU He, LI Gang, <i>et al.</i> (4735)
Response Characteristics of Soil Microbial Community Under Long-term Film Mulching .....	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, DING Ji-na, <i>et al.</i> (4745)
Effects of Long-term Straw Returning on Fungal Community, Enzyme Activity and Wheat Yield in Fluvo-aquic Soil .....	MA Lei, LI Yan, WEI Jian-lin, <i>et al.</i> (4755)
Effects of Soil Amendments on the Bacterial Diversity and Abundances of Pathogens and Antibiotic Resistance Genes in Rhizosphere Soil Under Drip Irrigation with Reclaimed Water .....	..... CUI Bing-jian, CUI Er-ping, LIU Chun-cheng, <i>et al.</i> (4765)
Effect of Nitrogen on the Phytoremediation of Cd-PAHs Co-contaminated Dumpsite Soil by Alfalfa ( <i>Medicago sativa</i> L.) and on the Soil Bacterial Community Structure .....	..... LI Yi-jia, MA Jun-wei, LI Yu-qian, <i>et al.</i> (4779)
Effect of Antibiotic-Degrading Bacteria on Maturity and Bacterial Community Succession During Pig Manure Composting .....	LI Wei-lin, ZHANG Xin, MA Jun-wei, <i>et al.</i> (4789)