

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.3
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM _{2.5} 分布格局演变及其影响因素	黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)
中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析	方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)
阳泉市秋冬季 PM _{2.5} 化学组分及来源分析	王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)
泰安市夏季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源	衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)
黄山秋季大气颗粒物理化特性	卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)
北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性	曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)
淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征	王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)
鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析	付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)
浙江省汽车整车制造行业挥发性有机物产排污系数	滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)
基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征	王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)
薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征	牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘玺, 燕莹莹, 祁士华 (1107)
精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法	叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)
2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估	施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)
中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势	庞凯莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)
京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单	韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)
在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测	王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵玺乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)
参数选取对畜禽养殖业大气氨排放的影响: 以长三角地区为例	张琪, 黄凌, 殷司徒, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)
乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析	吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)
长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征	李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)
伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素	刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹霜, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)
城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)
基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例	王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)
黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素	梁晓文, 郇田田, 王涛 (1217)
人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析	温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)
滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响	张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)
太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征 (1997~2017 年)	杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)
汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系	薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)
盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价	王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 刘向阳 (1265)
三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量	陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)
化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响	罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)
利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放	柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)
茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性	范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)
3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性	王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)
新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附	徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)
三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险	方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)
固城湖及出入湖河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估	阚可聪, 谷孝鸿, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)
衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估	张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)
北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估	张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)
基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性	马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)
PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性	王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)
中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化	付昆明, 杨宗珏, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)
抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响	代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 亮根祥, 胡双庆 (1401)
多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验	张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志成, 曹思雨 (1409)
剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响	邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)
硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响	何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)
工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析	李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)
耕地土壤重金属健康风险空间分布特征	姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)
黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析	赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)
不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响	李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)
红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征	章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)
有机肥与无机肥配施对潮土 N ₂ O 排放的影响	孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)
冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系	王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)
钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响	鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)
桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应	方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)
外源亚精胺对 As ⁵⁺ 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响	刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩廿, 刘玉荣, 胡红青 (1505)
《环境科学》征订启事 (1024) 《环境科学》征稿简则 (1092) 信息 (1226, 1264, 1417)	

京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单

韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚

(中国民航大学空中交通管理学院, 天津市空管运行规划与安全重点实验室, 天津 300300)

摘要: 基于国际民航组织(ICAO)标准排放模型, 调查搜集京津冀机场群9个机场实际航班情况, 充分考虑了大气混合层高度的影响, 采用EPA方法修正运行时间, 精确估算了2018~2019航季年(364 d)京津冀机场群飞机起飞着陆循环(LTO)大气污染物排放清单。结果表明, 2018~2019航季年京津冀机场群飞机LTO循环 NO_x 、CO、 SO_2 、HC和PM排放总量分别为10 720.5、3 972.2、407.8、508.0和53.7 t。其中, 冬春航季排放量分别为4 290.2、1 646.7、168.3、220.1和22.4 t; 夏秋航季排放量分别为6 430.3、2 325.5、239.5、287.9和31.3 t。从空间分布来看, 北京首都机场是该机场群大气污染物排放量最多的机场。从时间分布来看, 07:00~08:00处于排放量最高峰, 12:00~20:00处于中等偏高排放水平, 21:00之后排放量相对较低。飞机在LTO循环中 NO_x 和CO排放量较多, PM排放量最少。各污染物不同工作模式下的排放情况差异明显。在该机场群起降所有机型中, B777单位LTO循环排放污染物最多, B737最少, B787单位LTO循环排放HC最低。

关键词: 京津冀; 机场群; 起飞着陆循环; 大气污染物; 排放清单

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1143-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201908199

Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China

HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, WANG Yu

(Tianjin Key Laboratory for Air Traffic Operation Planning and Safety Technology, College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Based on the International Civil Aviation Organization's standard emission model, this survey collected the actual flight conditions of the nine airports in the Beijing-Tianjin-Hebei airport group, fully considered the impact of the height of the atmospheric mixed layer, and revised the operating time using the US Environmental Protection Agency method to accurately estimate the 2018-2019 shipping season (364 days) landing and take-off cycle (LTO) air pollutant emissions list for Beijing-Tianjin-Hebei airport group aircraft. The results show that the total emissions of NO_x , CO, SO_2 , HC, and PM in the LTO cycle of the Beijing-Tianjin-Hebei airport group in the 2018-2019 season are 10 720.5, 3 972.2, 407.8, 508.0, and 53.7 t, respectively. Within these, the winter and spring season emissions are 4 290.2, 1 646.7, 168.3, 220.1, and 22.4 t, respectively; and the summer and autumn season emissions are 6 430.3, 2 325.5, 239.5, 287.9, and 31.3 t, respectively. From the perspective of spatial distribution, Beijing Capital Airport is the airport in the group with the largest amount of air pollutants discharged. Regarding time distribution, the highest peak is at 07:00-08:00, there is a medium-high emission level from 12:00-20:00, and the emissions are relatively low after 21:00. The aircraft emit more NO_x and CO in the LTO cycle, with PM accounting for the least amount of emissions. The discharges of different pollutants under different working modes are significantly different. Of all the aircraft in the airport group, the B777 unit LTO discharges the most pollutants, that of the B737 is the least, and the B787 unit LTO circulation HC is the lowest.

Key words: Beijing-Tianjin-Hebei; airport group; landing and take-off cycle; air pollutants; emission inventory

交通运输业是我国大气污染物重要排放源之一, 机动车、船舶和飞机等交通工具在消耗燃油的同时产生多种不同类型的大气污染物, 都在一定程度上影响着大气环境和人体健康^[1~3]。当前, 民航飞机主要使用涡轮发动机, 排放的污染物包括 NO_x 、HC、CO、 SO_2 和PM等^[4~6]。相对于高空巡航阶段飞机在地面起飞着陆循环(landing and take-off cycle, LTO循环)阶段的排放更为突出^[7~9]。有研究表明, 民航飞机的活动是机场区域最主要的排放源^[10], 由其排放的污染物, 将导致附近的居民增加出现健康问题或加剧现有疾病的可能性^[11]。国内外针对民航飞机大气污染物排放情况开展了不同程度的研究, Song等^[12]、Winther等^[13]和Turgut等^[14]相

继对韩国济州国际机场(2012年)、丹麦哥本哈根国际机场(2015年)和土耳其国家航空公司(2017年)飞机大气污染物排放清单进行了计算; 徐冉等^[15]于2016年对首都国际机场航空器排放清单进行了研究; 王瑞宁等^[16]以2017年为基准年对长三角地区民航飞机LTO循环大气污染物排放清单进行了研究。

近年来, 京津冀地区大气污染平均超标天数比例高达40%以上, 远高于长三角和珠三角等地

收稿日期: 2019-08-23; 修订日期: 2019-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1933110); 天津市自然科学基金项目(18JCYBJC23800); 中央高校基本科研业务费专项(3122016A012)

作者简介: 韩博(1982~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为大气环境、民航环境管理, E-mail: hanbo@live.com

区^[17]. 该地区目前共有 9 个民航运输机场, 大气污染物排放量较大, 数据显示^[18], 2018 年京津冀机场群完成旅客吞吐量为 1.51 亿人次, 仅次于长三角机场群, 位居我国四大机场群第二位, 其中, 北京首都国际机场旅客吞吐量突破 1 亿人次, 居国内各机场首位. 目前, 尚缺乏将京津冀区域机场群作为整体, 进行飞机 LTO 循环大气污染物排放的相关研究.

本研究基于 ICAO 标准排放模型, 考虑大气混合层高度对飞机 LTO 运行时间和污染排放的影响, 较为精确地计算了京津冀机场群 2018 ~ 2019 航季年大气污染物排放清单. 同时分析了不同机型和工作模式的差异, 并对该机场群污染物排放的时空分布进行了研究, 旨在为改善京津冀地区环境空气质量提供重要依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域与时间

本研究的区域为京津冀机场群的 9 个重要民航机场, 如图 1 所示, 其中包括: 北京首都机场 (PEK)、北京南苑机场 (NAY)、天津滨海机场 (TSN)、石家庄正定机场 (SJW)、唐山三女河机场 (TVS)、邯郸马头机场 (HDG)、秦皇岛北戴河机场 (BPE)、承德普宁机场 (CDE) 和张家口宁远机场 (ZQZ). 以该区域机场的进离港民航飞机为研究对象, 涵盖的大气污染物包括 NO_x 、HC、CO、 SO_2 和 PM.

根据我国民航系统关于航季的划分, 每年分冬春和夏秋两个航季, 本文研究基准年为 2018 ~ 2019 航季年, 共计 364 d. 其中, 包括冬春航季 2018 年 10 月 28 日至 2019 年 3 月 30 日, 共计 154 d; 夏秋航季 2019 年 3 月 31 日至 2019 年 10 月 26 日, 共计 210 d. 此外, 唐山机场于 2019 年 4 月 1 日至 5 月 28 日停航, 该航季年运行时间为 306 d; 南苑机场于 2019 年 9 月 29 日关闭, 该航季年运行时间为 337 d.

1.2 气态污染物计算模型

采用 ICAO 规定的 NO_x 、HC 和 CO 这 3 种污染物的排放因子, 先分别计算各类污染物在发动机不同工作模式下的排放量, 然后再计算各类污染物的总排放量. 计算公式如下所示.

$$E_{i,m} = \left(\sum_j N_j \text{FF}_{j,m} \text{EI}_{i,j,m} t_{j,m} \right) \times 60 \times n \times k \quad (1)$$

式中, $E_{i,m}$ 表示 i 类污染物在 m 工作模式下的排放量 (g); N_j 表示京津冀机场群 j 型发动机的数量 (台); $\text{FF}_{j,m}$ 表示 j 型发动机在 m 工作模式下的燃油消耗率 ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$); $\text{EI}_{i,j,m}$ 表示 j 型发动机在 m 工作模式下 i 类污染物的排放因子 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); $t_{j,m}$ 表示 j

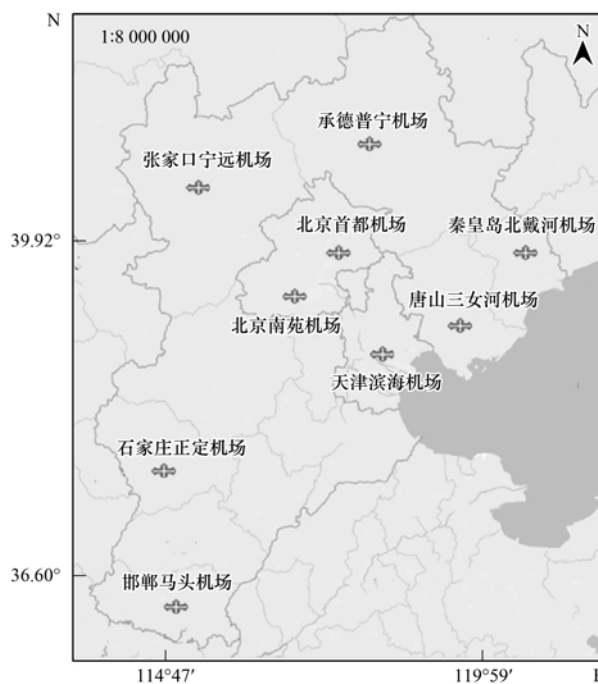


图 1 研究区域示意

Fig. 1 Research area

型发动机在 m 工作模式下的工作时间 (min); n 表示统计时段内的日均 LTO 循环数量; k 表示对应航季的总天数.

相关研究发现 SO_2 的排放量取决于航空燃油的燃烧效率和航空燃油中的含硫量^[19], 本研究的 SO_2 排放量采用物料衡算法计算.

1.3 颗粒物计算模型

采用一阶近似法 (FOA3.0), 利用发动机的烟度和空燃比等分别估算出挥发性颗粒和非挥发性颗粒物的排放指数, 根据总排放指数、燃油流量以及不同模式的工作时间计算出 PM 的排放量.

$$\text{EI}_{\text{PMvol-o}} = \delta \times \text{EI}_{\text{HC}} \times 10^{-3} \quad (2)$$

$$\text{EI}_{\text{PMvol-s}} = 3 \times 10^3 \times \text{FSC} \times \lambda \quad (3)$$

$$\text{EI}_{\text{PMnvol}} = 0.694 \times 10^{-4} \times \text{SN}^{1.234} \times (0.776 \times \text{AFR} + 0.877) \quad (4)$$

$$\text{EI}_{\text{PM}} = \text{EI}_{\text{PMvol-o}} + \text{EI}_{\text{PMvol-s}} + \text{EI}_{\text{PMnvol}} \quad (5)$$

式中, $\text{EI}_{\text{PMvol-o}}$ 表示挥发性颗粒物有机组分排放指数 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); δ 表示 $\text{EI}_{\text{PMvol-o}}$ 和 EI_{HC} 的比例系数 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$), 起飞、爬升、进近和滑行模式下的取值分别为 115、76、56.25 和 6.17; EI_{HC} 表示发动机 HC 排放指数 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); $\text{EI}_{\text{PMvol-s}}$ 表示挥发性颗粒物含硫组分排放指数 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); FSC 表示航空燃料中的含硫量, 默认为 0.068%; λ 表示发动机燃油的硫转化效率, 采用高硫燃油的默认值为 0.033; $\text{EI}_{\text{PMnvol}}$ 表示非挥发性颗粒物组分排放指数 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); SN 表示发动机排气烟度, 无量纲, 取自 ICAO 发动机排

放数据库^[20]；AFR 表示发动机在不同工作模式下的空燃比，无量纲，起飞、爬升、进近和滑行模式下的取值分别为 45、51、83 和 106。

1.4 混合层高度修正模型

ICAO 规定飞机的爬升模式，主要是指从起飞结束至上升到大气混合层（固定为 915 m，3 000 ft）的高度，但实际运行中的混合层高度会随时间、地点以及气象条件发生改变，使用 ICAO 规定的 915 m 的高度计算会产生较大的误差，本文选取京津冀机场群各机场地区日最大混合层高度进行计算，选取情况如表 1 所示。

本研究采用 EPA 方法修正 ICAO 规定的爬升、进近参考时间，修正公式如下：

$$T_{j,app} = t_{j,app} \times \frac{H_{ML} - 152}{762} \tag{6}$$

$$T_{j,c/o} = t_{j,c/o} \times \left(\frac{H_{ML}}{914} \right) \tag{7}$$

式中， $T_{j,app}$ 和 $T_{j,c/o}$ 表示搭载 j 型发动机的飞机进近和爬升阶段实际运行时间（min）； $t_{j,app}$ 和 $t_{j,c/o}$ 表示 ICAO 规定航空器进近和爬行参考时间，分别取 4.0 min 和 2.2 min； H_{ML} 表示京津冀机场群各机场实际日最大混合层高度（m）。

1.5 日均 LTO 循环数确定

本研究根据航班进离港信息，在冬春航季和夏秋航季，分别选取 3 d，统计各机场 3 d 内 LTO 循环总量，用于计算该航季日均 LTO 循环数量。其中，冬春航季选取 2019 年 1 月的 6、7 和 8 日进行统计；

夏秋航季选取 2019 年 4 月的 22、23 和 24 日。此外，唐山机场夏秋航季由于部分时间停航，该航季统计时间为 2019 年 5 月的 29、30 和 31 日。

表 1 京津冀机场群日最大混合层高度情况
Table 1 Maximum mixed layer height of the Beijing-Tianjin-Hebei airport group

城市	高度/m				文献
	春季	夏季	秋季	冬季	
北京	1 254	1 200	1 100	1 084	[21]
天津	1 168	915	915	915	[22]
石家庄	915	915	915	864	[23]
唐山	915	915	915	915	[20]
邯郸	915	915	915	915	[20]
秦皇岛	915	915	915	1 136	[24]
承德	1 247	1 247	1 247	1 123	[25]
张家口	900	900	900	900	[26]

2 结果与分析

2.1 污染物排放清单

2018~2019 航季年，京津冀机场群飞机 LTO 循环大气污染物排放清单计算结果如表 2 所示。可见，京津冀地区，各机场 LTO 过程中 NO_x、CO、SO₂、HC 和 PM 的航季年排放总量分别为 10 720.5、3 972.2、407.8、508.0 和 53.7 t。其中，冬春航季排放量分别为 4 290.2、1 646.7、168.3、220.1 和 22.4 t；夏秋航季排放量分别为 6 430.3、2 325.5、239.5、287.9 和 31.3 t。该机场群排放的最主要污染物是 NO_x，CO 是仅次于 NO_x 的污染物，HC、SO₂ 和 PM 的排放量相对较少。

表 2 2018~2019 航季年京津冀机场群飞机 LTO 循环大气污染物排放清单

Table 2 List of LTO circulating air pollutants from Beijing-Tianjin-Hebei airport group aircraft during the 2018-2019 season

城市	机场	年 LTO 循环 总量/次	大气污染物排放量/t				
			NO _x	CO	SO ₂	HC	PM
北京	北京首都机场	289 930	7 995.2	2 597.6	306.2	351.1	38.9
	北京南苑机场	21 100	645.8	151.7	13.9	15.6	2.1
天津	天津滨海机场	76 913	1 250.4	706.5	52.9	91.7	7.6
河北	石家庄正定机场	42 803	674.5	409.7	28.1	35.9	4.2
	邯郸马头机场	3 591	66.0	40.2	2.5	6.0	0.4
	唐山三女河机场	1 848	19.1	18.1	1.0	1.9	0.1
	承德普宁机场	1 559	24.1	14.8	1.1	1.8	0.2
	秦皇岛北戴河机场	2 236	26.3	20.9	1.3	2.3	0.2
	张家口宁远机场	1 125	19.1	12.7	0.8	1.7	0.1
	合计	441 105	10 720.5	3 972.2	407.8	508.0	53.7

2.2 空间分布

图 2 所示为京津冀机场群飞机 LTO 循环大气污染物排放空间分布情况。各污染物在排放总量上处于不同数量级，NO_x 排放量相对最高，CO 次之，SO₂ 和 HC 排放量相当，PM 排放量相对最少。各机场排放量差异明显。北京首都机场年 LTO 循环总量

占该区域总和的 65%，各污染物排放量均排在首位，5 种污染物排放量占该区域总和的比值均大于 65%，其中，NO_x 和 SO₂ 占比可达 74.2% 和 74.9%；天津滨海机场是该区域吞吐量第二的机场，其污染物排放量也位于第二位；石家庄正定机场和北京南苑机场年 LTO 循环总量处于中等，污染物排放量也

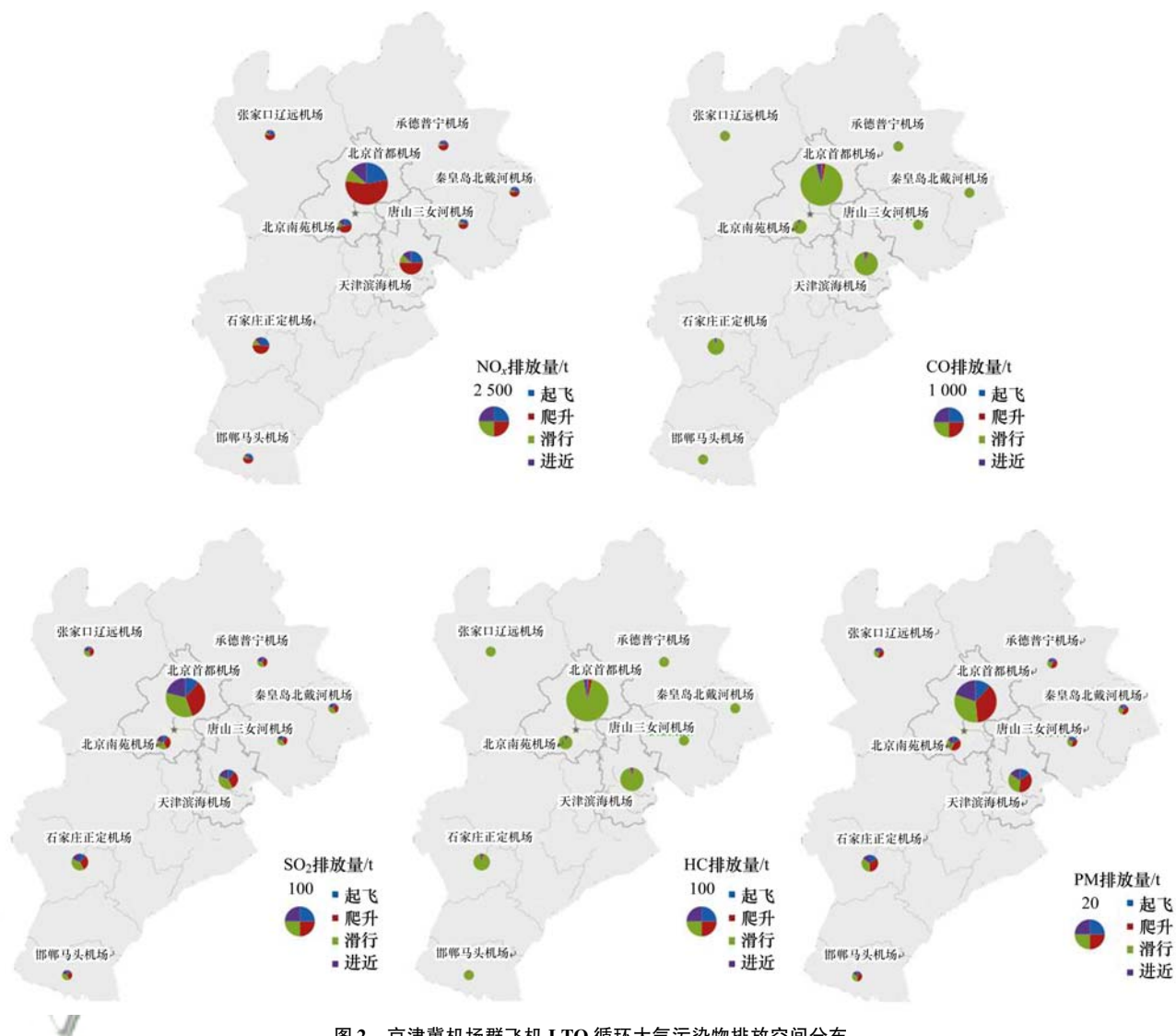


图2 京津冀机场群飞机 LTO 循环大气污染物排放空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of air pollutant emissions from the LTO cycle of Beijing-Tianjin-Hebei airport group aircraft

处于中等水平;邯郸、唐山、承德、秦皇岛和张家口等地机场年 LTO 循环总量较少,各污染物排放量均最低,仅占 0.2%~1.2%。各机场不同工作模式下的大气污染物排放占比基本相近。

2.3 时间分布

统计京津冀机场群整体每小时 LTO 循环数量,根据公式(1)~(7),计算出大气污染物排放日分布情况如图 3 所示。该区域冬春航季和夏秋航季小时 LTO 循环数具有很高的相似性,且该区域民航飞机 LTO 循环排放量最高值出现在 07:00~08:00,这是因为该时间段内飞机的小时 LTO 循环次数达到最高值,随着飞机的起落次数的减少,08:00~10:00 内排放量大幅度下降。12:00~20:00,处于中等偏高排放水平,这不仅与该时间段航班的起落架次较高有关,而且还与下午时间段内大气边界层高度相对较高有关。21:00 之后,航班量开始降低,飞机污染物的排放量也逐渐降低。

3 讨论

3.1 机型影响分析

飞机类型是决定污染物排放量最基本的因素。图 4 所示为京津冀机场群不同机场机型与排放占比情况。该机场群主要机型包括波音、空客和巴西 ERJ 系列这 3 大类,双发机型较多。各机场机型占比情况差异明显,北京首都机场机型种类和数量最多,其中 B737、A320、A321 和 A330 占比较高,所占比例分别为 31.3%、13.7%、14.3% 和 17.3%;北京南苑机场是中联航的主运营基地,机型全部为 B737;天津滨海和石家庄正定机场 B737 机型占比较高,分别为 52.4% 和 43.1%;唐山三女河机场、秦皇岛北戴河机场、承德普宁机场和张家口宁远机场属支线机场,机型数量较少,ERJ190 机型占有一定的比例,分别为 25%、37.5%、20% 和 40%。

图 5 所示为京津冀机场群部分机型污染物排放

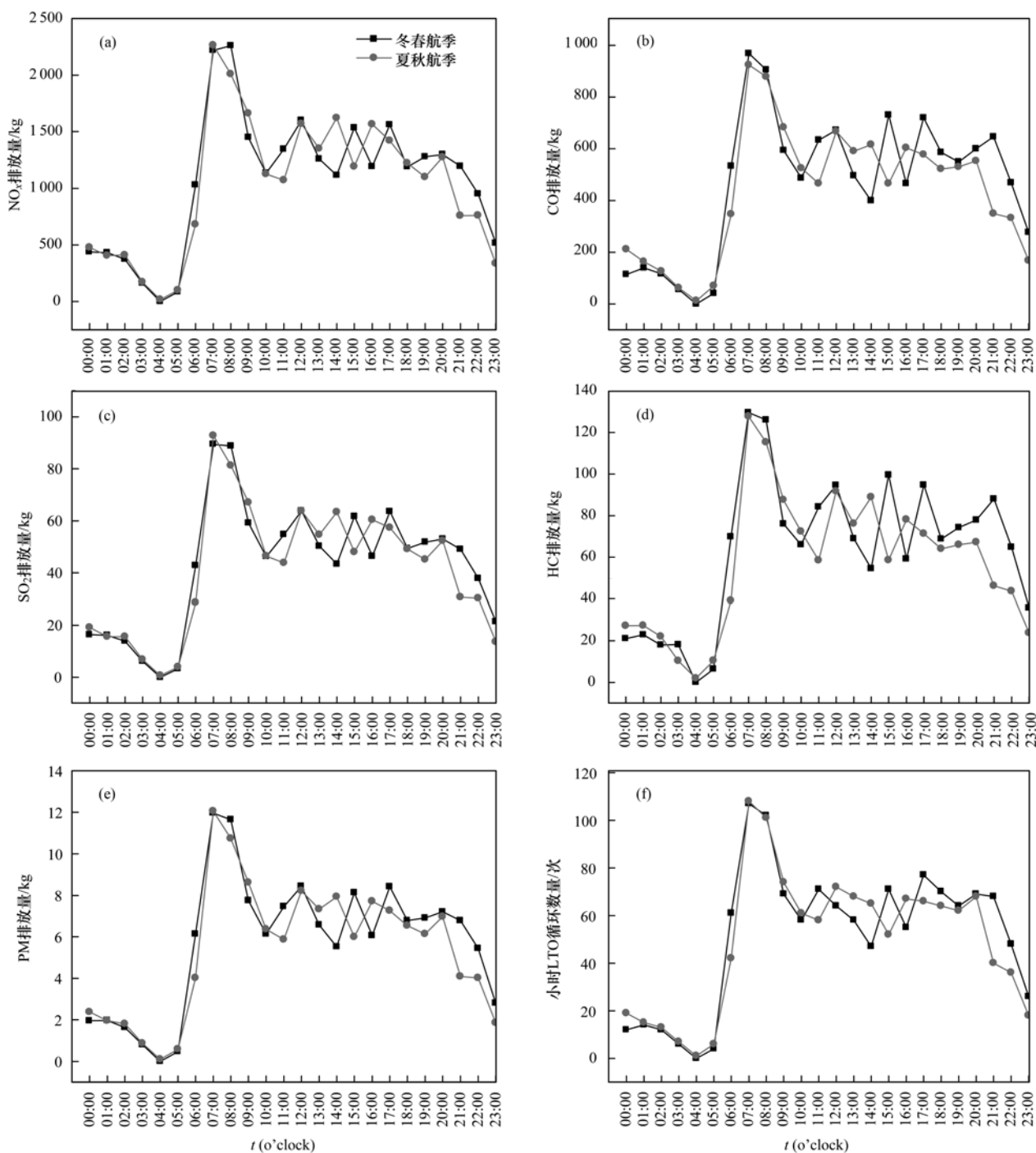


图3 京津冀机场群飞机 LTO 循环大气污染物排放时间分布

Fig. 3 Time distribution of air pollutant discharge in the LTO cycle of Beijing-Tianjin-Hebei airport group aircraft

总量占比情况. B737 排放的 NO_x 、CO、 SO_2 和 PM 总量最多, 分别占各污染物排放总量的 26%、35%、29% 和 37%; A320 所排放的 HC 最多, 占 HC 排放总量的 32%, 其排放 CO 总量仅次于 B737 机型; A330 排放各种污染物都占有一定的比例, 处于中等排放水平; ERJ190 排放量较少, 是因为该机型 LTO 循环数量较少的缘故. 5 种污染物, 不同机型排放占比略有不同, 这与各机型单位 LTO 循环排放量有关.

图 6 表示京津冀机场群部分机型单位 LTO 循环污染物排放情况. 经对比, 本研究结果与 ICAO 规

定的 NO_x 、HC 和 CO 这 3 种污染物的排放因子相符合. 京津冀所有机型中, B777 的单位 LTO 循环排放污染物最多; B787 的单位 LTO 循环排放 HC 最低, 几乎为零, 这与京津冀机场群中 B787 所配备的发动机排放 HC 的排放因子有关. ERJ190 的 SO_2 、 NO_x 和 PM 这 3 种污染物的单位 LTO 循环排放明显低于其他机型, 而 CO 和 HC 的排放显著高于其他机型, 其单位 LTO 循环排放 CO 约是 B737 的 1.7 倍.

3.2 工作模式分析

京津冀机场群飞机 LTO 循环各工作模式下大

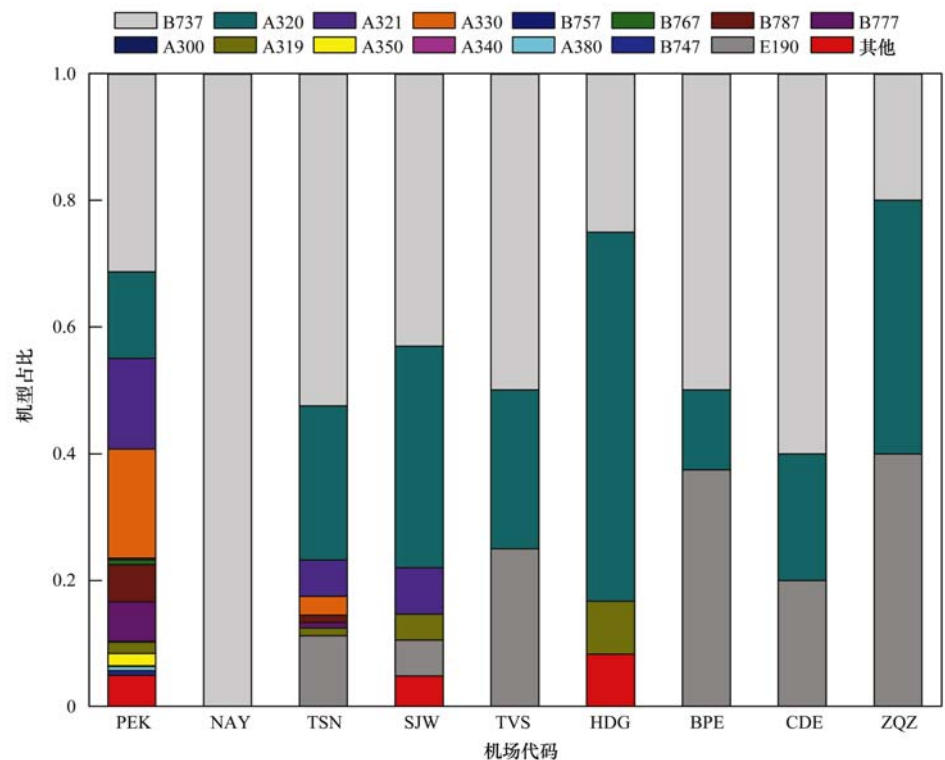


图 4 京津冀机场群各机场机型分类
Fig. 4 Beijing-Tianjin-Hebei airport group aircraft classification

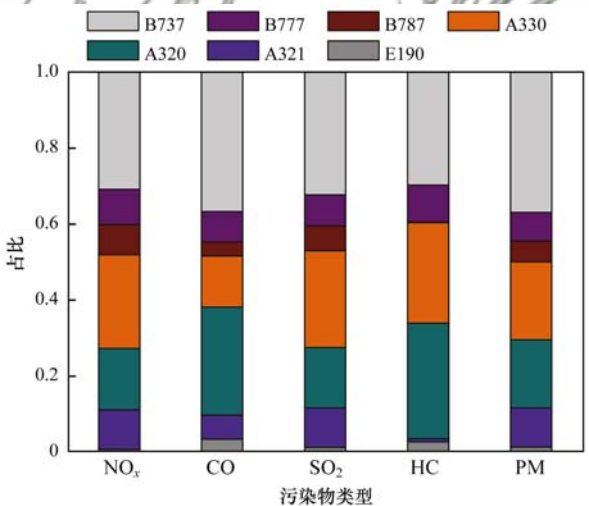


图 5 不同机型污染物排放占比

Fig. 5 Percentages of pollutant emissions from different models

气污染物排放贡献率如图 7 所示。可见,因各工作模式下发动机排放指数不同,所以各污染物在不同工作模式下的排放占比也存在较大差异。 NO_x 的排在爬升阶段占比最大,占排放 NO_x 总量的 51%,这与王瑞宁等^[16]的研究结果相似,其得到长三角区域民航飞机排放 NO_x 主要来自爬升阶段; HC 和 CO 的排放基本全部来自滑行阶段,可达到 93.1% 和 93.9%,产生这种情况的原因是由于飞机在滑行时发动机低负荷运行,容易导致燃油不完全燃烧,从而排放较高的 HC 和 CO; SO_2 的排放量按工作模式从高到低分别是滑行、爬升、进近

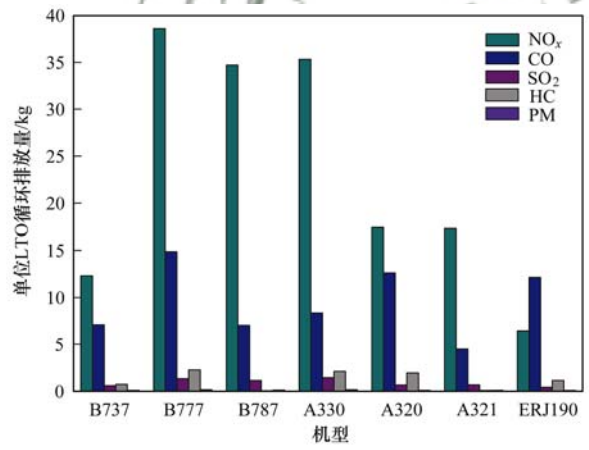


图 6 单位 LTO 循环不同机型污染物排放情况

Fig. 6 Emissions of pollutants from different models of the LTO cycle

和起飞,分别占排放 SO_2 总量的 40%、30%、18% 和 12%;不同工作模式排放 PM 的占比情况与排放 SO_2 相似。

3.3 与其他研究对比分析

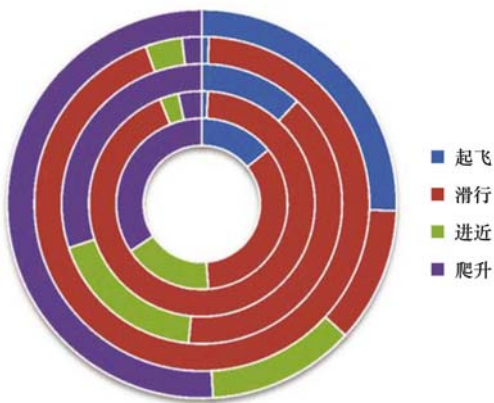
表 3 所示为京津冀机场群大气污染物单位 LTO 循环排放与其他研究对比情况。数据显示,京津冀机场群单位 LTO 循环 NO_x 、CO、 SO_2 、HC 和 PM 排放量分别为 24.3、9.0、0.9、1.2 和 0.1 $\text{kg} \cdot \text{次}^{-1}$, CO、 SO_2 和 PM 的单位 LTO 循环排放量略低于长三角机场群, NO_x 和 HC 的单位 LTO 循环排放量略高于长三角机场群,这种情况与机场内主要运行飞机比例不同有关。与 2013 年首都国际机场单位 LTO 循环

表 3 京津冀机场群大气污染物单位 LTO 循环排放与其他研究对比情况

Table 3 Comparison of LTO cycle emissions of atmospheric pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei airport group and other studies

机场	年份	单位 LTO 循环排放/kg·次 ⁻¹					文献
		NO _x	CO	SO ₂	HC	PM	
京津冀机场群	2018 ~ 2019	24.3	9.0	0.9	1.2	0.1	本研究
首都国际机场	2013	24.8	11.2	1.5	1.0	—	[15]
长三角机场群	2017	19.7	9.9	1.4	0.9	0.2	[16]

1) “—”表示对应研究中未涉及该污染物



由外到内依此为 NO_x、CO、SO₂、HC 和 PM

图 7 各工作模式下主要大气污染物排放贡献率

Fig. 7 Contribution rate of major atmospheric pollutants discharged under various working modes

排放量相比,京津冀机场群 HC 单位 LTO 循环排放量高于首都机场,NO_x、CO 和 SO₂ 的排放量相对较低。

排放总量方面,京津冀机场群 5 种污染物排放均低于长三角机场群,这与长三角机场群机场数量较多有关。与 2016 年相比,首都国际机场 2018 ~ 2019 航季年 NO_x 和 SO₂ 排放总量有所升高,其余 3 种污染物排放量均有所降低,这与修正爬升和进近阶段时间有关。

4 结论

(1)根据本研究结果显示,2018 ~ 2019 航季年京津冀机场群飞机 LTO 循环 NO_x、CO、SO₂、HC 和 PM 排放总量分别为 10 720.5、3 972.2、407.8、508.0 和 53.7 t。其中,冬春航季排放量分别为 4 290.2、1 646.7、168.3、220.1 和 22.4 t;夏秋航季排放量分别为 6 430.3、2 325.5、239.5、287.9 和 31.3 t。NO_x 是京津冀地区飞机 LTO 循环排放量最大的污染物。

(2)空间分布计算结果表明,北京首都国际机场是京津冀机场群飞机 LTO 循环大气污染物排放最多的机场,是由于该机场飞机起落频繁。时间分布计算结果表明,该区域大气污染物排放量夜间低,白天高,最高值出现在上午 07:00 ~ 08:00,排放量随

飞机起落次数的增减而变化。

(3)各污染物在 LTO 不同阶段排放量差异较大,这与各机型单位 LTO 循环排放量有关。NO_x 主要来自于爬升阶段;HC 和 CO 的排放基本全部来自滑行阶段;SO₂ 排在滑行、爬升、进近、起飞阶段的占比分别为 40%、30%、18% 和 12%;PM 排放量最少,其不同工作模式下排放的占比情况与 SO₂ 相似。

参考文献:

[1] 王人洁,王堃,张帆,等.中国国道和省道机动车尾气排放特征[J].环境科学,2017,38(9):3553-3560.
Wang R J, Wang K, Zhang F, et al. Emission characteristics of vehicles from national roads and provincial roads in China[J]. Environmental Science, 2017, 38(9): 3553-3560.

[2] 徐文文,殷承启,许雪记,等.江苏省内河船舶大气污染物排放清单及特征[J].环境科学,2019,40(6):2595-2606.
Xu W W, Yin C Q, Xu X J, et al. Vessel emission inventories and emission characteristics for inland rivers in Jiangsu province[J]. Environmental Science, 2019, 40(6): 2595-2606.

[3] 何吉成.30年来中国民航运输行业的大气污染物排放[J].环境科学,2012,33(1):1-7.
He J C. Air pollutant emissions of aircraft in China in recent 30 years[J]. Environmental Science, 2012, 33(1): 1-7.

[4] 韩博,黄佳敏,魏志强.民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析[J].环境科学,2016,37(12):4524-4530.
Han B, Huang J M, Wei Z Q. Gaseous emission characterization of civil aviation aircraft during takeoff[J]. Environmental Science, 2016, 37(12): 4524-4530.

[5] Stettler M E J, Boies A M, Petzold A, et al. Global civil aviation black carbon emissions[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(18): 10397-10404.

[6] 韩博,刘雅婷,陈鑫,等.民航飞机起飞过程细颗粒物排放特征[J].中国环境科学,2017,37(5):1620-1627.
Han B, Liu Y T, Chen X, et al. Fine particles emission characterization of civil aviation aircraft during takeoff[J]. China Environmental Science, 2017, 37(5): 1620-1627.

[7] Masiol M, Harrison R M. Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: a review[J]. Atmospheric Environment, 2014, 95: 409-455.

[8] Vichi F, Frattoni M, Imperiali A, et al. Civil aviation impacts on local air quality: a survey inside two international airports in central Italy[J]. Atmospheric Environment, 2016, 142: 393-405.

[9] Hudda N, Simon M C, Zamore W, et al. Aviation-related impacts on ultrafine particle number concentrations outside and inside residences near an airport[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(4): 1765-1772.

- [10] Simonetti I, Maltagliati S, Manfredi G. Air quality impact of a middle size airport within an urban context through EDMS simulation[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2015, **40**: 144-154.
- [11] Fajersztajn L, Guimarães M T, Duim E, *et al.* Health effects of pollution on the residential population near a Brazilian airport: a perspective based on literature review[J]. *Journal of Transport & Health*, 2019, **14**: 100565, doi: 10.1016/j.jth.2019.05.004.
- [12] Song S K, Shon Z H. Emissions of greenhouse gases and air pollutants from commercial aircraft at international airports in Korea[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **61**: 148-158.
- [13] Winther M, Kousgaard U, Ellermann T, *et al.* Emissions of NO_x, particle mass and particle numbers from aircraft main engines, APU's and handling equipment at Copenhagen Airport [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **100**: 218-229.
- [14] Turgut E T, Cavcar M, Usanmaz O, *et al.* Investigating actual landing and takeoff operations for time-in-mode, fuel and emissions parameters on domestic routes in Turkey [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, **53**: 249-262.
- [15] 徐冉, 郎建垒, 杨孝文, 等. 首都国际机场飞机排放清单的建立[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(8): 2554-2560.
Xu R, Lang J L, Yang X W, *et al.* Establishment of aircraft emission inventory for Beijing capital international airport [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(8): 2554-2560.
- [16] 王瑞宁, 黄成, 任洪娟, 等. 长三角地区民航飞机起飞着陆(LTO)循环大气污染物排放清单[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(11): 4472-4479.
Wang R N, Huang C, Ren H J, *et al.* Air pollutant emission inventory from LTO cycles of aircraft in civil aviation airports in the Yangtze River Delta region, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(11): 4472-4479.
- [17] 中华人民共和国生态环境部. 中国生态环境状况公报[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2015-2018.
- [18] 中国民航局. 2018 年民航机场生产统计公报[R]. 北京: 中国民航局, 2019.
- [19] 黄成, 安静宇, 鲁君. 长三角区域非道路移动机械排放清单及预测[J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 3965-3975.
Huang C, An J Y, Lu J. Emission inventory and prediction of non-road machineries in the Yangtze River Delta region, China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 3965-3975.
- [20] ICAO. ICAO engine exhaust emissions data bank [R]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2015.
- [21] 杜吴鹏, 房小怡, 黄宏涛, 等. 北京近年地表风速和大气混合层厚度变化特征研究[J]. *环境科学与技术*, 2017, **40**(6): 149-156.
Du W P, Fang X Y, Huang H T, *et al.* Variation characteristics of surface wind speed and atmospheric mixing layer height in recent years in Beijing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **40**(6): 149-156.
- [22] 蔡子颖, 张敏, 韩素芹, 等. 天津重污染天气混合层厚度阈值及应用研究[J]. *气象*, 2018, **44**(7): 911-920.
Cai Z Y, Zhang M, Han S Q, *et al.* Research on threshold and regularity of mixed layer thickness in heavy pollution weather in Tianjin [J]. *Meteorological Monthly*, 2018, **44**(7): 911-920.
- [23] 李梦, 唐贵谦, 黄俊, 等. 京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系[J]. *环境科学*, 2015, **36**(6): 1935-1943.
Li M, Tang G Q, Huang J, *et al.* Characteristics of winter atmospheric mixing layer height in Beijing-Tianjin-Hebei region and their relationship with the atmospheric pollution [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 1935-1943.
- [24] 张恒德, 吕梦瑶, 张碧辉, 等. 2014 年 2 月下旬京津冀持续重污染过程的静稳天气及传输条件分析[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(12): 4340-4351.
Zhang H D, Lü M Y, Zhang B H, *et al.* Analysis of the stagnant meteorological situation and the transmission condition of continuous heavy pollution course from February 20 to 26, 2014 in Beijing-Tianjin-Hebei [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(12): 4340-4351.
- [25] 周士茹, 陆倩, 张晓辉, 等. 承德市近五年大气污染气象条件分析[J]. *环保科技*, 2018, **24**(6): 31-36.
Zhou S R, Lu Q, Zhang X H, *et al.* Meteorological conditions of atmospheric pollution in Chengde City in 2013-2017 [J]. *Environmental Protection and Technology*, 2018, **24**(6): 31-36.
- [26] 刘学锋, 任国玉, 梁秀慧, 等. 河北地区边界层内不同高度风速变化特征[J]. *气象*, 2009, **35**(7): 46-53.
Liu X F, Ren G Y, Liang X H, *et al.* The characteristics of wind speed variation at different altitudes of boundary layer in Hebei province [J]. *Meteorological Monthly*, 2009, **35**(7): 46-53.

CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM _{2.5} Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM _{2.5} During Autumn and Winter in Yangquan City	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM _{2.5} from Taian City During the Summer	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
Variations of Stable Oxygen and Deuterium Isotopes in River and Lake Waters During Flooding Season Along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Regions	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR)	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City	LI Yan-ling, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil	JI Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Types on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from Fluvo-aquic Soil in the North China Plain	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As ⁵⁺ Stress	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)