



文章栏目：大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202112212 中图分类号 X513;V235 文献标识码 A

曲春刚, 匡家骏, 晏嘉伟. 不同航班季节下民航飞机 LTO 循环颗粒物排放特性—以北京首都国际机场为例[J]. 环境工程学报, 2022, 16(8): 2640-2652. [QU Chungang, KUANG Jiajun, YAN Jiawei. Studies on LTO cyclic particulate emission characteristics of civil aircraft in different flight seasons-A case study of Beijing Capital International Airport[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(8): 2640-2652.]

不同航班季节下民航飞机 LTO 循环颗粒物排放特性—以北京首都国际机场为例

曲春刚[✉], 匡家骏, 晏嘉伟

中国民航大学航空工程学院, 天津 300300

摘要 飞机的颗粒物排放会造成环境影响。为评估不同航班季节下颗粒污染物排放水平, 采用基于黑碳形成氧化法 (FOX) 的改进计算方法对非挥发性颗粒物 (PM_{nvol}) 排放指数进行了估算。使用 B777、A320、A321、A330、B738 机型历史 QAR 数据中空气流量、燃油流量等发动机参数, 计算不同航班季节下多个 LTO 循环颗粒物排放指数及排放量。结果表明: 在北方夏季气温较冬季大幅上升时, 尽管 PM_{nvol} 排放指数呈下降趋势, 但受燃油消耗率增加的影响, A320、A321、B738 等主要机型颗粒物排放量显著升高, 夏秋航季单次 LTO 循环较冬春航季分别升高了 15.3、13.8、13.4 g, 其涨幅为 18.6%、21.3%、17.7%; B777 等推力较大机型在夏秋季及冬春季燃油消耗率变化不大, 夏秋航季单次 LTO 循环颗粒物排放量较冬春航季略低, 降幅仅 3%, 约 4.1 g; 以北京首都国际机场实际起降数据为例, 以上主要机型夏秋航季较冬春航季颗粒物总排放量分别增加了 0.5、1.6、1.7、1.6、3.7 t。本研究表明, 各机型不同航季下颗粒污染物排放差异显著, 其影响不可忽视。以上飞机颗粒物排放特性分析结果可为民航业建立完整排放清单, 实现航空发动机污染的精确管控提供参考。

关键词 航空发动机; 快速存取记录器的数据 (QAR 数据); 污染物排放特性; 航班季节; LTO 循环

预计至 2036 年, 全球商业航空活动会比 2020 年增加两倍^[1]。随着机场数量、航班数量的增加, 航空发动机排放造成的大气污染愈发严重。航空发动机排放污染物主要包括氮氧化物 (NO_x)、一氧化碳 (CO)、未燃碳氢化合物 (UHC)、二氧化硫 (SO_2) 与颗粒污染物 (PM) 等^[2]。颗粒物被认为是引起全球气候变化的重要成分, 其中细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 易被人体吸入, 在肺内沉积并诱发很多呼吸疾病^[3-4]。为对颗粒物排放进行限制及监测, 我国民航局于 2020 年 11 月决定对《涡轮发动机飞机燃油排泄和排气排出物规定》(CCAR-34) 进行修订^[5]。国际民航组织 (International Civil Aviation Organization, ICAO) 也在 2020 年发布了最新《机场空气质量手册》, 建议各地空气质量监管部门应建立完整的排放清单, 包括不同时间下的污染物排放情况, 以评估当前或未来的污染物浓度, 并为减排规划提供基础^[6]。

由于在一个航季年中, 夏秋、冬春航季的环境气温存在明显差异, 这直接影响了航空发动机的燃烧效率, 进而会对颗粒物中的非挥发性颗粒物 (主要为黑碳) 的产生造成影响。因此, 评估不同航班季节、不同环境气温下的颗粒物排放对制定完整的排放清单, 以及研究发动机排放特性具

收稿日期: 2021-12-30; 录用日期: 2022-06-10

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目 (2020YJS003); 中国民航大学开放基金资助项目 (000031020102)

第一作者: 曲春刚 (1979—), 男, 硕士, 副教授, pqbird@sina.com; ✉通信作者

有重要意义。针对航空发动机颗粒物排放，国际民航组织提出了一阶近似方法 (first order approximation, FOA) 对其质量进行估算。根据该方法，闫国华等^[7] 计算了民航飞机在一个完整的起飞和降落阶段 (landing and take-off cycle, LTO 循环) 的颗粒物排放，定量地分析了航空发动机颗粒物排放对机场周边空气质量的影响。魏志强等^[8] 根据 ICAO 排放数据库数据，在考虑实际大气环境与飞行参数的基础上，结合一阶近似方法给出了颗粒物的排放指数修正模型，并基于实际飞行参数对污染物排放量进行了估算。孙见忠等^[9] 根据发动机性能模型，结合实际飞行参数及 ICAO 排放数据研究了发动机性能退化对于污染物排放的影响，并提出了排放量估算方法；同时指出，飞机巡航速度、飞行高度与发动机的老化等都会对飞机尾气污染物排放量产生影响。通过对实际滑行时间和大气混合层高度修正，韩博等^[10] 估算了粤港澳大湾区机场群 2018—2019 年的颗粒物排放量，建立了机场排放清单。YANG 等^[11] 考虑真实航班运行数据、混合层高度等因素，基于该方法建立了 2015 年北京首都国际机场航空发动机、地面设备等的颗粒物排放清单，估算出颗粒物年排放量约为 149 t。WINTHER 等^[12] 建立了丹麦哥本哈根国际机场单日颗粒物排放清单，结果表明慢车和起飞阶段的排放占比分别为 40%、20% 左右。STETTLER 等^[13] 建立了基于该方法的英国机场颗粒物排放清单，所得计算值与实验测量值偏差大于 40%。该方法首先规定了飞机在不同飞行阶段下推力的大小 (进近、滑行、起飞、爬升阶段的推力分别为 30%、7%、100%、85%)，然后在试车台上测量这 4 个推力下的烟度值 (smoke number, SN)，最后根据烟度值拟合得出黑碳浓度 (C_{BC}) 及排放指数。

然而，飞机在实际运行过程中的推力大小并不是根据飞行阶段就能简单区分开的稳定值，即使是在飞机滑行阶段，发动机推力仍会发生变化，而且目前大多数飞机起飞时，均采用减推力起飞，此时若也采用 FOA 方法中 100% 推力烟度值，则可能产生较大误差。另外，航空发动机烟度值与黑碳质量之间也存在较大的不确定性^[14]。对此，曹惠玲等^[15] 基于快速存取记录器的数据 (Quick Access Recorder, 简称 QAR 数据)，从黑碳形成和氧化过程出发，采用基于黑碳形成和氧化过程的形成氧化法 (formation oxidation process, FOX)，对全航段中黑碳排放指数进行了计算和分析。然而，该方法在计算发动机主燃区温度时，是通过结合燃烧反应物和产物的绝对焓值进行线性拟合而来，而燃料的燃烧并不完全，故该方法可能过高估算了主燃区温度，进而低估了颗粒物的排放量。另外，制定更加精细化的飞机发动机污染物排放清单也需要对不同机型在不同环境温度下的排放特性进行研究。

本研究采用 B777、A320、A321、A330、B738 飞机实际飞行过程中的 QAR 数据，从燃烧能量平衡过程出发，计算航空发动机主燃区温度，对形成氧化方法进行改进，根据改进方法对飞机颗粒物排放指数及排放量进行计算，从而定量分析不同机型在不同航季下 LTO 循环颗粒物排放变化，并对北京首都国际机场主要机型在不同航季下的 LTO 循环颗粒物排放量进行计算，以期为更精细化的飞机发动机污染物排放清单的制定提供参考。

1 不同航班季节下民航飞机 LTO 循环颗粒物排放指数计算模型

1.1 概述

颗粒污染物主要由非挥发性颗粒物 (PM_{nvol})，挥发性硫酸盐颗粒物 ($PM_{vol-FSC}$)，挥发性有机颗粒物 ($PM_{vol-FuelOrganics}$) 和挥发性滑油生成有机颗粒物 ($PM_{vol-oil}$) 组成，而非挥发性颗粒物的主要组分是黑碳气溶胶^[16]。由于尚未开展挥发性滑油生成有机颗粒物排放量的计算研究，故主要针对其他 3 种颗粒物进行估算。当航空发动机随环境温度变化时，其性能参数也会发生改变，尤其是对发动机燃烧室主燃区温度的影响，进而影响燃烧。本研究在形成氧化法的基础上，从能量平衡的角度对发动机主燃区温度 T_n 进行计算，对形成氧化方法进行改进。利用改进方法，评估航空发动机在各个航班季节下的 LTO 循环颗粒物排放特征趋势，其计算流程如图 1 所示。

1.2 非挥发性颗粒物(PM_{nvoll})排放指数计算方法

非挥发性颗粒物的主要成分是黑碳气溶胶。根据ICAO推荐的一阶近似方法,基于排放指数数据库中4个飞行阶段的烟度值来计算黑碳浓度。然而,在实际运行中,由于航班延误、空中管制等诸多因素影响,各飞行阶段的时间往往与排放数据库推荐值不符,不同时刻的推力值是实时变化的,与排放数据库推荐的按不同飞行阶段固定推力的估算方法有较大区别,因而会对整个LTO循环中颗粒物排放估算造成较大影响。本研究采用基于黑碳形成和氧化过程的形成氧化方法。在此方法的基础上从能量平衡过程对主燃区温度进行计算,并提出改进的形成氧化方法。该方法在满足适航规章要求的前提下,充分考虑了环境温度、压力等参数,以及燃油燃烧程度对黑碳排放的影响。

黑碳排放指数 EI_{BC} (单位 $mg \cdot kg^{-1}$)是由黑碳质量浓度 C_{BC} (单位 $mg \cdot m^{-3}$)与涡扇发动机每千克航空煤油的废气容积流量 Q_{Mixed} (单位 $m^3 \cdot kg^{-1}$)相乘所得到的,具体计算方法及公式参考文献[15]。该计算方法中,实时黑碳浓度会受到燃油流量 m_f (单位 $kg \cdot s^{-1}$)、空气燃油比(air fuel ratio, AFR,后简称“空燃比”)及主燃区温度 T_{fl} (单位K)的影响。其中,燃油流量 m_f 及空燃比可通过QAR数据直接获取,但主燃区温度 T_{fl} 目前受材料限制,无法直接得到。原方法为将燃烧反应物和产物的绝对焓值进行线性拟合得到式(1),即可计算主燃区温度。

$$T_{fl} = 0.9T_3 + 2120 \quad (1)$$

然而,在航空发动机实际运行过程中,燃油的燃烧效率约为96%^[17],无法完全燃烧,故该方法可能过高估算了主燃区温度,进而低估了颗粒物的排放量。主燃区温度 T_{fl} 与燃料种类、燃烧方法、燃烧室入口总温、传热条件等诸多因素有关,主要取决于燃烧过程的热平衡。从航空煤油燃烧过程出发,该过程是位于燃烧室内进行的定压加热过程,不发生高温热分解现象,由能量平衡关系可得到主燃区温度 T_{fl} 的关系式(式(2))。

$$T_{fl} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{m_2 \cdot C_p} \quad (2)$$

式中: Q_1 为燃料的化学能,J; Q_2 为空气带入的物理热,J; Q_3 为燃料带入的物理热,J。具体计算见式(3)~式(5)。

$$Q_1 = m_f \cdot q \quad (3)$$

$$Q_2 = C_{p1} \cdot m_{air} \cdot T_3 \quad (4)$$

$$Q_3 = C_{p2} \cdot m_f \cdot T_f \quad (5)$$

式中: m_{air} 为空气流量,kg; T_3 为燃烧室入口气温,K; T_f 为航空煤油温度,K; C_{p1} 和 C_{p2} , $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$,分别为空气和航空煤油的定压比热容。改进的形成氧化方法可根据能量平衡方程对发动机主燃区温度进行计算,并考虑飞机实际运行中参与燃烧的因素,包括空气温度、燃油温度、航空煤油的热值等。环境气温直接影响了燃烧过程中空气、燃油的物理热,进而影响了主燃区温度,对黑碳的形成造成了直接影响。改进方法考虑了参与燃烧的物质物理热,物理热中涵盖了

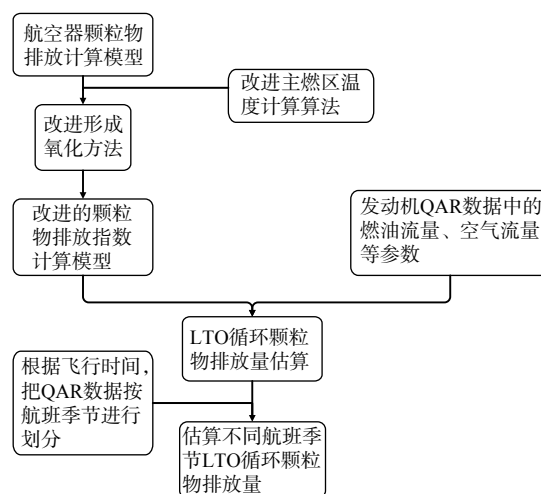


图1 不同航季下颗粒物排放特征趋势估算流程

Fig. 1 Estimation process of particulate emission characteristics trend in different sailing seasons

环境气温参数，能更准确地计算非挥发性颗粒物排放指数 EI_{BC} ，且适用于目前所有使用传统燃料的航空发动机。

1.3 挥发性硫酸盐颗粒物 ($PM_{vol-FSC}$) 排放指数计算方法

挥发性硫酸盐颗粒物主要由燃料硫转化而成。 SO_2 通过氧化作用变成 SO_3 ，随后在火焰羽流中发生水合作用变为硫酸盐颗粒物，其排放指数不随功率设定值变化而变化，而是由燃料含硫量 (fuel sulfur content, FSC) 及 SO_2 到 SO_3 的转换率 (ϵ) 计算得到。具体计算过程参见文献 [6]，计算公式见式 (6)。

$$EI_{PM_{vol-FSC}} = (10)^6 \cdot \left[\frac{(FSC) \cdot (\epsilon) \cdot (MW_{out})}{MW_{Sulphur}} \right] \quad (6)$$

式中： $MW_{out}=96$ ， $MW_{Sulphur}=32$ ， $FSC=0.068\%$ ， $\epsilon=2.4\%$ 。燃料含硫量 FSC、 SO_2 向 SO_3 的转换率 ϵ 可能存在差异。据最新测量值，ICAO 建议将 FSC、 ϵ 分别设为 0.068%、2.4%。

1.4 挥发性有机颗粒物 ($PM_{vol-FuelOrganics}$) 排放指数计算方法

挥发性有机颗粒物排放指数是将 ICAO 发动机排放数据库所列的发动机碳氢化合物排放指数与其比率值 (δ) 相乘得到 (式 (7))。

$$EI_{PM_{vol-FuelOrganics}} = (\delta) \cdot (EI_{HCEngine}) \quad (7)$$

式中： δ 为按不同飞行阶段的恒定比率数值。对应状态下的数值为慢车 6.17 $mg \cdot g^{-1}$ 、起飞 115 $mg \cdot g^{-1}$ 、爬升 76 $mg \cdot g^{-1}$ 、进近 56.25 $mg \cdot g^{-1}$ 。

根据 ICAO 推荐方法计算挥发性硫酸盐颗粒物和挥发性有机颗粒物排放指数，再结合 QAR 数据中燃油流量及运行时间计算排放总量。

1.5 颗粒污染物排放量计算模型

颗粒污染物排放量主要由燃油流量、不同阶段飞行时间以及排放指数的乘积决定。航空器 LTO 循环包括：滑行/地面慢车 (Taxi)、起飞 (Take-off)、爬升 (Climb) 和进近 (Approach) 4 个阶段。定义为从地面到大气层边界面 3 000 英尺高度内的空间。在该高度下，发动机颗粒污染物的排放与扩散会直接影响机场周边空气质量。一个标准的起降循环如图 2 所示。

LTO 循环 E_{mi} 由各个飞行阶段的不同时刻下燃油流量 Q_{fi} 及排放指数 EI_{BC} 相乘之后累加得到，如式 (8) 所示。

$$E_{mi} = \sum_{i=1}^n Q_{fi} \times T_i \times EI_{BC} \quad (8)$$

式中： E_{mi} 为各阶段不同种类颗粒物的排放总量； n 为各阶段的时间帧数； Q_{fi} 和 T_i 分别为各时间帧的燃油流量和工作时间。在计算时，各个飞行阶段的排放指数计算方法不同，故要对飞行阶段进行划分，为确定各个飞行阶段的不同运行时间，需对 QAR 数据按不同的时间帧进行飞行阶段划分。本研究结合 QAR 数据中的低压转子转速 (N_1)、高压转子转速 (N_2)、飞行高度 (H)、油门杆解算器角度 (TRA) 等参数对 LTO 阶段中慢车、起飞、爬升、进近 4 个阶段进行准确划分，各时间帧数下的飞行参数值都可在 QAR 数据中得到。

2 模型应用案例中的条件确定

为验证本研究所建立的改进主燃区温度计算的形成氧化计算模型可实时准确地计算航空发动

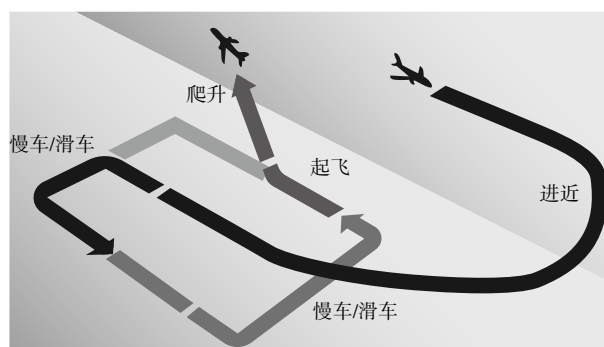


图 2 标准 LTO 循环过程图
Fig. 2 Standard LTO cycle diagram

机 LTO 循环颗粒物排放, 选取 B777、A320、A321、A330、B738(装配 GE90、V2500、V2522、PW4000、CFM56 发动机) 飞机左发、右发(左发、右发是搭载于飞机两侧的航空发动机) 的大量 QAR 数据, 计算不同机型冬春航季及夏秋航季 LTO 循环各阶段的颗粒物排放指数, 从而定量分析不同航季下不同型号航空器颗粒污染物排放量变化。

2.1 航季划分

目前, 我国民航系统每年都要进行 2 次航班计划调整。每年 3 月最后 1 个完整周的星期日至 10 月最后 1 个完整周的星期六, 执行夏秋季航班计划; 10 月最后 1 个完整周的星期日至第二年 3 月最后 1 个完整周的星期六, 执行冬春季航班计划^[18]。本研究基准年为 2017—2018 航季年, 共计 369 d。其中, 包括夏秋航季共计 216 d, 冬春航季共计 153 d。一方面, 这是考虑到旅游业的淡旺季、人群出行的周期性。根据航季的不同, 各航空公司将参照执行的航班收益情况, 在新航季里对现有航班进行调整。另一方面, 根据我国实际情况, 春夏和秋冬之间全国天气、气压均有较大差异, 飞行标准亦有不同。在此基础上, 根据 QAR 数据中的飞行日期, 把该年中 QAR 数据分为夏秋季航班 QAR 数据以及春冬季航班 QAR 数据, 以对不同航季下民航飞机颗粒物排放变化进行定量分析。

2.2 数据筛选

选取交付后稳定飞行的发动机历史 QAR 数据。根据该数据, 发现少数时刻由于监测探头损伤, 数据记录错误等因素影响, 会造成监测数据出现异常值。为保证计算精度, 需要对原始数据进行异常值筛选。选取拉依达准则法(3 δ 准则) 判别法对异常值进行处理。拉依达准则法是一种剔除异常值的方法。该方法利用标准偏差按一定概率确定一个区间, 并认为凡超过这个区间的误差, 就不属于随机误差而是粗大误差, 含有该误差的数据应予以剔除。根据全航段的 QAR 数据, 按 QAR 中的低压转子转速 N_1 、飞行高度 H 等飞行参数, 划分为滑行、起飞、爬升、进近 4 个阶段。分别对 4 个阶段进行等精度测量, 独立得到 X_1 、 X_2 、……, X_n 。 X 为算术平均值, 若某个测量值 X_b 的剩余误差 $V_b(1 \leq b \leq n)$, 满足式(9), 则认为 X_b 是含有粗大误差值的坏值, 应予剔除。

$$|V_b| = |X_b - X| > 3\sigma \quad (9)$$

式中: σ 为标准偏差。由于滑行阶段飞行状态较平稳, 故对滑行阶段选取数据值在 $(\mu - \sigma) \sim (\mu + \sigma)$ 的数据; 而起飞、爬升、进近阶段飞行参数变化较大, 选取数据值于 $(\mu - 3\sigma) \sim (\mu + 3\sigma)$ 内的数据。

另外, 影响单次航班 LTO 循环颗粒物排放指数的因素较多, 直接相关的有起飞重量、发动机性能衰退、减推力起飞等。为定量分析不同航季下颗粒污染物的排放变化, 还需对 QAR 数据进行筛选。本研究选取了起飞重量相近, 以全推力起飞的 QAR 数据, 同时选取飞行航段内发动机 EGTM 较高且发动机出厂日期较新的发动机数据。这是由于此时发动机的性能状态较好^[19], 可忽略性能衰退对颗粒污染物排放造成的影响。

2.3 非挥发性颗粒物排放指数

首先, 以目前推力最大、燃油消耗率较高的 GE90 型发动机为例, 该发动机搭载于 B777 飞机上, 选取其 2017—2018 年多个不同架次航班的 QAR 数据来计算颗粒物排放指数。所选取 QAR 数据中, 平均环境温度最低为 -10°C , 最高为 38.4°C , 基本满足我国北方地区一年内气候的温度变化区间, 计算结果见图 3。

在滑行阶段, 飞机的飞行状态平稳, 发动机各性能参数稳定。故单架次中, PM_{nvot} 排放指数相对稳定, 同一温度下不同滑行时间的 PM_{nvot} 排放指数波动幅度不大, 偶有起伏。但随着该年内环境温度不断变化, PM_{nvot} 排放指数从约 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降至 $33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 可明显发现不同环境温度下, PM_{nvot} 排放指数差异显著。冬春季航班 PM_{nvot} 排放指数较高、夏秋季航班 PM_{nvot} 排放指数较低, 相差约 17.5%。

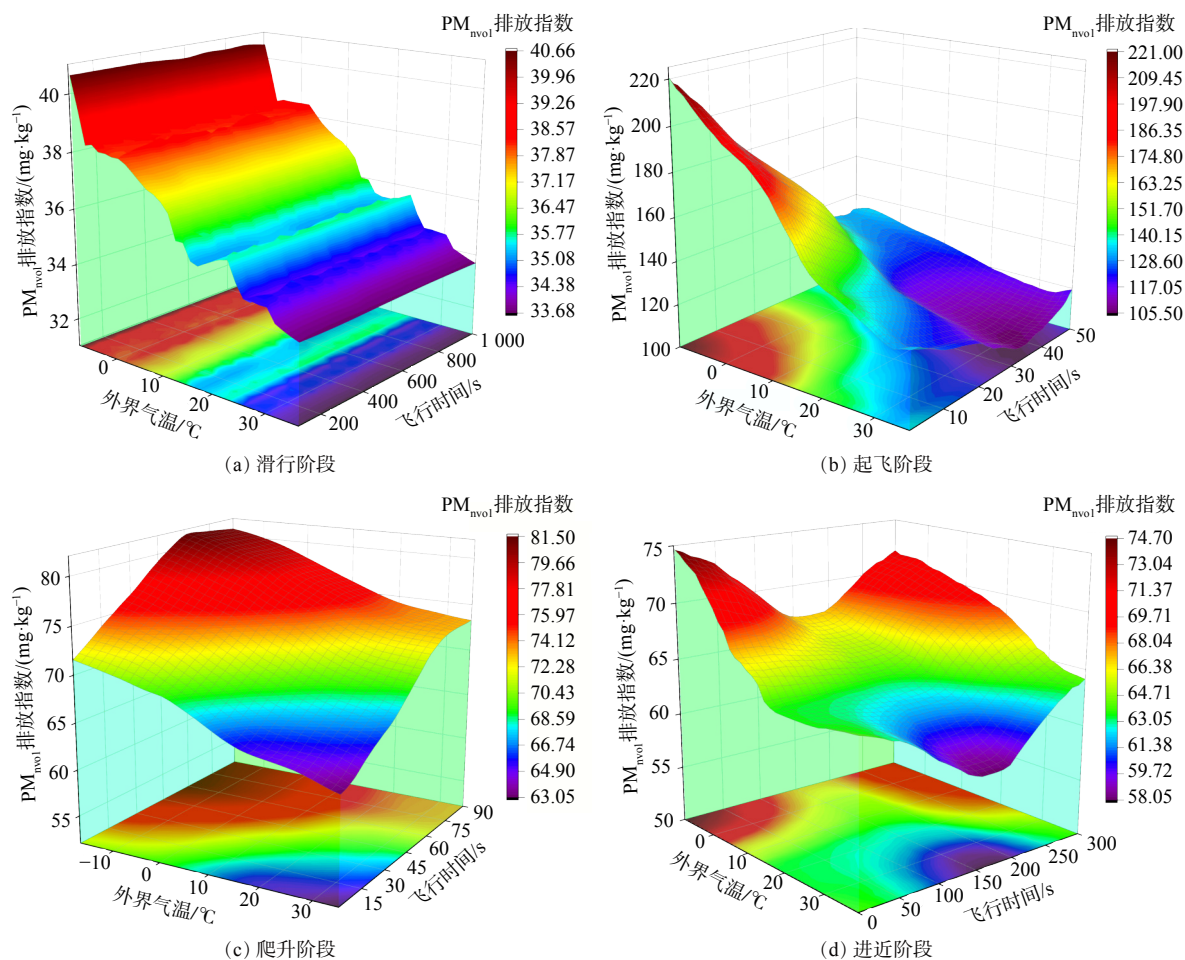


图 3 GE90 型发动机不同航季下 LTO 循环 PM_{nvol} 排放指数

Fig. 3 PM_{nvol} emission indexes of LTO cycle of GE90 engine in different seasons

在起飞与爬升阶段，夏秋季较冬春季的 PM_{nvol} 也分别下降了 41.18%、22.2%。在起飞阶段 PM_{nvol} 排放指数从 $221 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右下降到 $130 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。爬升阶段则是从约 $81 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降至 $63 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。就单次航班而言，在起飞时 PM_{nvol} 排放指数相较滑行阶段升高了 5 倍，但持续时间较短；在爬升过程中受发动机推力增加、燃油流量增大的影响，故 PM_{nvol} 排放指数增大。

同样，在进近阶段，夏秋季较冬春季 PM_{nvol} 排放指数下降了 23.08%，从约 $78 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降至 $60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。值得注意的是，单次航班中进近过程的 PM_{nvol} 排放指数先是缓慢下降，在到达一定高度后，排放指数会突然增大。这可能是受飞机控制系统的影响，由于此时飞机仍未落地，但受到了较大空气阻力，从而增加燃油流量以提供更大的推力，从而使 PM_{nvol} 排放指数升高。

为充分反映民航飞机在不同航季下颗粒物排放特性，以 A320、A330、A321、B738 这 4 种主流机型的 QAR 数据，计算其夏秋、冬春航季内颗粒物排放指数。由于部分机型在进近阶段的排放指数差异略小，为更直观分析其排放水平，根据排放指数做进近阶段趋势线（见图 4）。其中， $35\sim 17\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的数据为夏秋航季内 PM_{nvol} 排放指数变化， $13\sim(-6\text{ }^{\circ}\text{C})$ 的数据为冬春航季内 PM_{nvol} 排放指数变化。

目前，主流机型 PM_{nvol} 排放指数均呈现出冬春季高、夏秋季低的趋势，但各机型间排放指数及变化幅度存在差异。其中，对于功率相近的 A320 飞机与 B738 飞机而言，以冬季时滑行阶段为例，虽然其额定推力、燃油消耗率相近，但两种飞机的 PM_{nvol} 排放指数却分别为 95.4、40.2

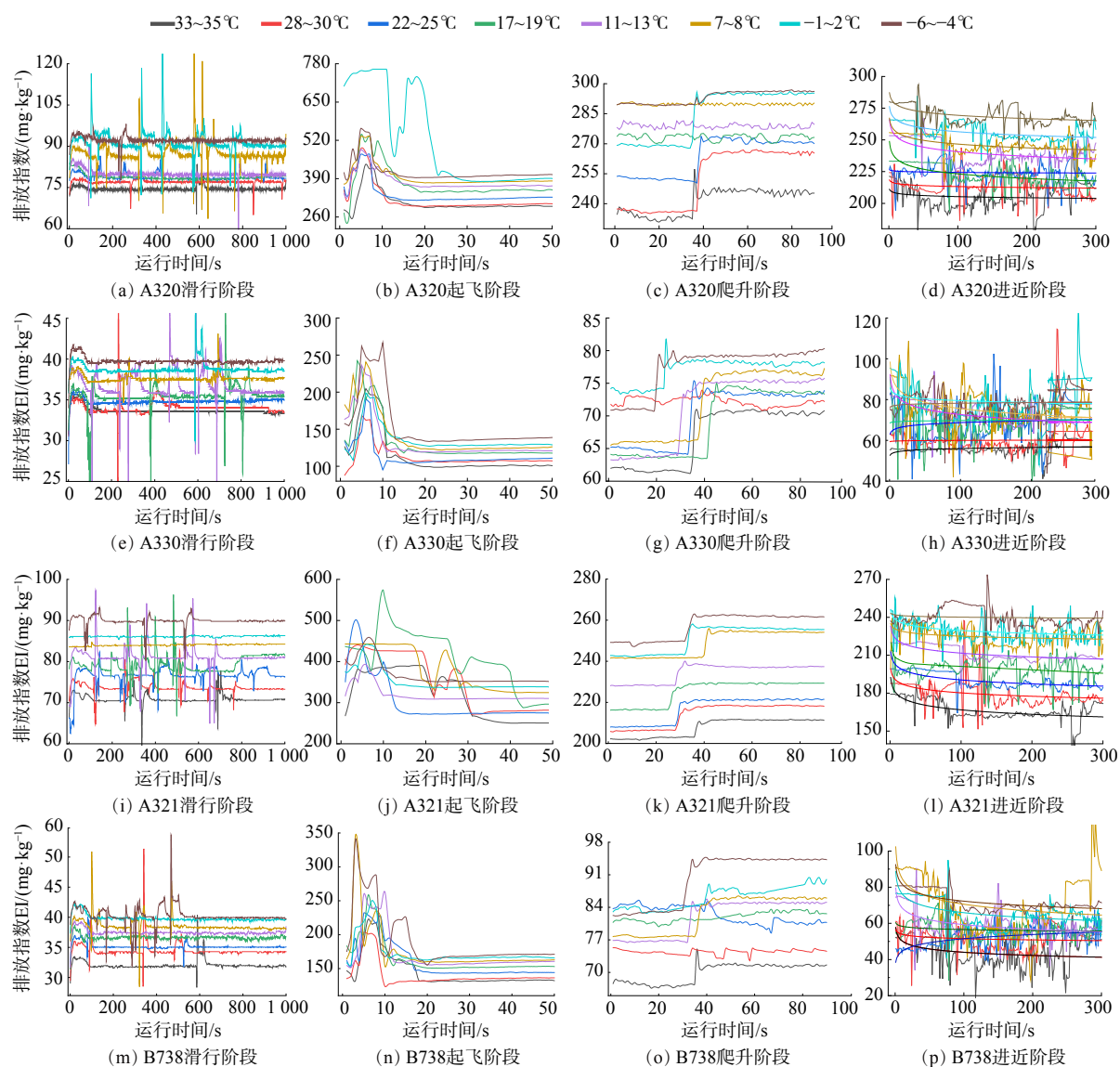
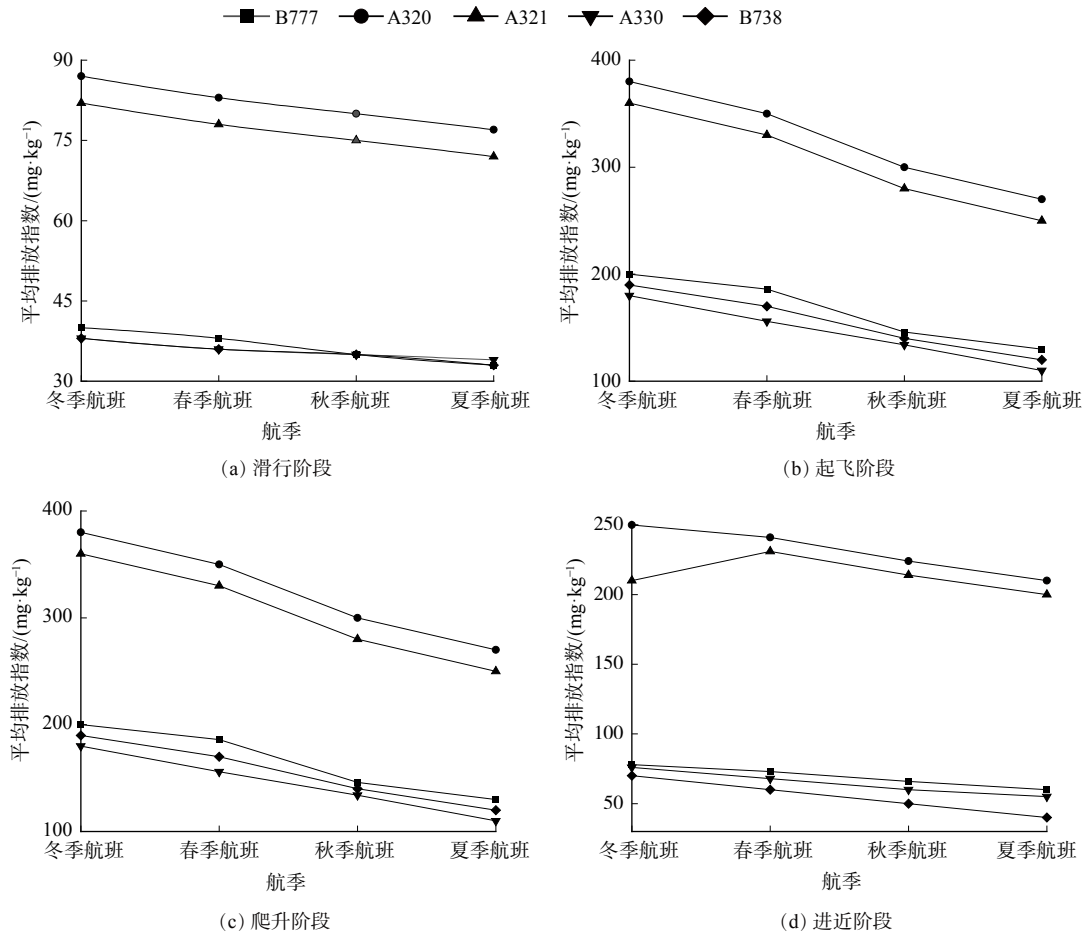


图4 不同航季下典型机型主发动机LTO循环 PM_{nvol} 排放指数

Fig. 4 Typical aircraft PM_{nvol} emission index of LTO cycle in different seasons

$mg \cdot kg^{-1}$, 相差了约2倍, 起飞阶段甚至相差3~4倍; A330飞机 PM_{nvol} 排放指数较搭载GE90的B777飞机排放指数略小, 但变化趋势相近; 进近阶段发动机燃油流量、空气流量波动大, 使A330、B738飞机 PM_{nvol} 排放指数变化幅度也增大。为得出其在不同航季下排放指数水平, 做进近阶段各机型 PM_{nvol} 排放指数趋势线, 根据此趋势线及各机型LTO循环的 PM_{nvol} 排放指数线, 可发现主流机型在冬春季 PM_{nvol} 排放指数较高, 而夏秋季 PM_{nvol} 排放指数较低。为得到各机型在不同航季下整个LTO循环的 PM_{nvol} 排放指数变化情况, 本研究按不同航班季节划分后取 PM_{nvol} 平均排放指数 \bar{E} , 结果见图5。 PM_{nvol} 平均排放指数从高到低依次为冬季、春季、秋季、夏季航班。各机型间排放指数不同, 呈下降趋势。

对于5种机型LTO循环各阶段平均排放指数, 除A321飞机在进近阶段有所差异外, 其余均呈现夏季高、冬季低的航季变化趋势。其中, 起飞和爬升阶段变化最为显著, 滑行及进近阶段略缓。A320机型起飞阶段 PM_{nvol} 排放指数下降最大, 从 $381 mg \cdot kg^{-1}$ 降至 $268 mg \cdot kg^{-1}$, 降幅为

图 5 不同航季下各机型 LTO 循环 PM_{nvol} 平均排放指数Fig. 5 Typical aircraft average emission index of PM_{nvol} in LTO cycle in different sailing seasons

29.7%。B738 机型在在滑行阶段降幅最小，仅下降了 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。结合 PM_{nvol} 形成和氧化过程分析其原因，其生成是由燃烧不完全所致，当外界气温升高，参与燃烧的空气、燃油的物理热也提高，使燃烧更完全，进而使 PM_{nvol} 排放指数降低。然而， PM_{nvol} 排放指数的降低并不意味着颗粒物排放量的减少，还需考虑航空发动机的燃油消耗率。

2.4 挥发性硫酸盐颗粒物及挥发性有机颗粒物排放指数

根据 ICAO 给定模型计算挥发性硫酸盐颗粒物 $PM_{vol-FSC}$ 排放指数。挥发性有机颗粒物 $PM_{vol-FuelOrganics}$ 同样是燃料未完全燃烧的产物，故采用 ICAO 针对各型号发动机的推荐测量参数^[20](见表 1)。

3 模型应用案例的结果分析

3.1 不同航季下单次 LTO 循环的颗粒物排放量

前文对现行航班季节进行了划分，根据 1.2 节中 PM_{nvol} 排放指数改进计算方法，及 1.3、1.4 节中 ICAO 推荐的 $PM_{vol-FSC}$ 与 $PM_{vol-FuelOrganics}$ 排放指数计算方法，在此基础上结合 QAR 数据中燃油流量，对各机型 LTO 循环总颗粒污染物排放量进行计算，得出颗粒物排放总量，结果如图 6 所示。

对于 A320、A321、B738 等常见机型，单次航班 LTO 循环颗粒物排放量随着气温的升高而增大，分别增加了 15.3、13.8、13.4 g，涨幅为 18.6%、21.3%、17.7%。这种变化与 2.3 节中 PM_{nvol} 排放指数的变化相反。这是由于颗粒物排放量由排放指数、燃油流量、运行时间 3 个因素决定(式(8))。对非挥发性颗粒物 PM_{nvol} 而言，排放指数在气温升高时下降，但航空发动机燃油流量却会增

表1 $PM_{vol-FSC}$ 与 $PM_{vol-FuelOrganics}$ 排放指数

Table 1 $PM_{vol-FSC}$ and $PM_{vol-FuelOrganics}$ emission index

发动机型号	工作状态	推力设置	HC排放指数	$PM_{vol-FuelOrganics}$ 排放指数	$PM_{vol-FSC}$
GE90	慢车	7%	4.24	26.16	48.96
GE90	进近	30%	0.06	3.375	48.96
GE90	爬升	85%	0.03	2.28	48.96
GE90	起飞	100%	0.04	4.6	48.96
V2500	慢车	7%	0.11	0.68	48.96
V2500	进近	30%	0.06	3.375	48.96
V2500	爬升	85%	0.04	3.04	48.96
V2500	起飞	100%	0.04	4.6	48.96
CFM-56	慢车	7%	3.76	23.2	48.96
CFM-56	进近	30%	0.08	4.5	48.96
CFM-56	爬升	85%	0.03	2.28	48.96
CFM-56	起飞	100%	0.03	3.45	48.96
V2522	慢车	7%	0.14	0.86	48.96
V2522	进近	30%	0.07	3.94	48.96
V2522	爬升	85%	0.04	3.04	48.96
V2522	起飞	100%	0.03	3.45	48.96
PW4000	慢车	7%	4.66	28.75	48.96
PW4000	进近	30%	0.07	3.94	48.96
PW4000	爬升	85%	0.04	3.04	48.96
PW4000	起飞	100%	0.03	3.45	48.96

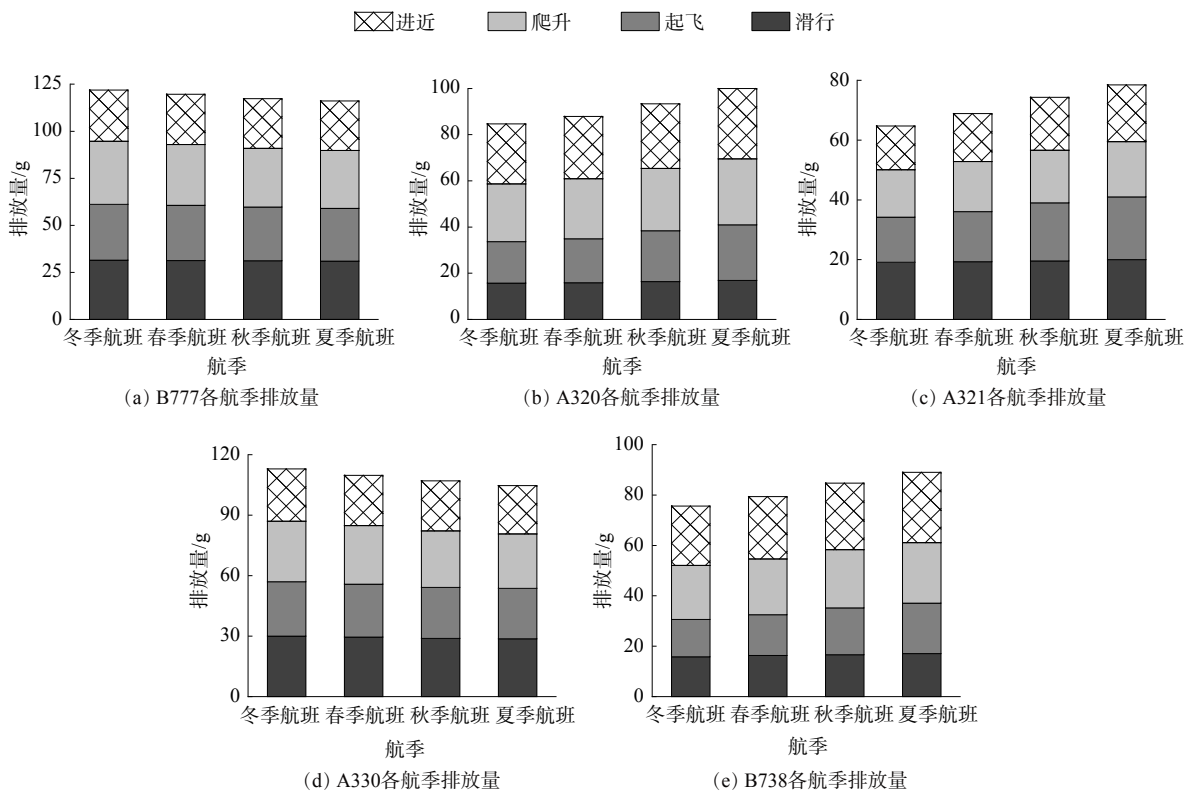


图6 不同航季下LTO循环单次航班颗粒污染物排放量

Fig. 6 LTO cycle single flight particle pollutant emission under different seasons

大。这是受到航空发动机共同工作原理影响，当气温升高时需增加燃油流量以保证发动机推力；另外，燃油流量的增加也会使得硫酸盐颗粒物 $PM_{vol-FSC}$ 及有机颗粒物 $PM_{vol-FuelOrganics}$ 排放量升高。综上所述，A320、A321、B738 几种机型的飞机夏季单次 LTO 循环颗粒物排放量较高。

而对于推力较大的 B777 及 A330 飞机，在不同航季下单次 LTO 循环颗粒物排放差异相对略小，总体趋势与 A320 等常见机型相反，呈现出冬季高，夏季略低的趋势，分别降低了 4.1、6.2 g。这类航空发动机的冬季及夏季燃油消耗率差异较小，对非挥发性颗粒物 PM_{nvol} 而言，虽然其夏季排放指数较冬季降幅较大，约为 22%，但由于燃油消耗率差异不大，使得总排放量仅下降了约 3.8%。上述变化趋势与文献 [21-22] 中，新郑国际机场及华北地区典型机场制定的排放清单关于 A320、A321、B738 等主要机型的颗粒物排放时间分布趋势相近。

3.2 北京首都国际机场颗粒污染物排放

不同季节下，我国南北方气温差异较大，东西部地区气温差异性也较大，因而民航飞机 LTO 循环颗粒污染物排放的动态特征也可能会呈现很大差别。本研究以北京首都国际机场一典型日起降航班为研究对象，该日共起降航班 1 690 架次^[23]，接近机场日起降平均值，各机型占比如见图 7。

根据机型占比情况，结合本研究针对 PM_{nvol} 改进形成氧化方法及 ICAO 对 $PM_{vol-FSC}$ 与 $PM_{vol-FuelOrganics}$ 推荐计算方法，计算主要机型(占比 80% 以上)夏秋季航班及冬春季航班颗粒污染物排放总量，并对日均排放量进行对比，结果见图 8。

在不同航季，民航飞机的 LTO 循环颗粒污染物排放差异显著。主要机型(如 A320、A321、B738)在夏秋航季单次 LTO 循环颗粒物排量高。另外，由于夏秋航季持续时间也较长，导致其夏秋航季比冬春航季总排放量分别增加了 1.6、1.7、3.7 t；对于 B777、A330 等大推力机型而言，虽然其在不同航季下单次

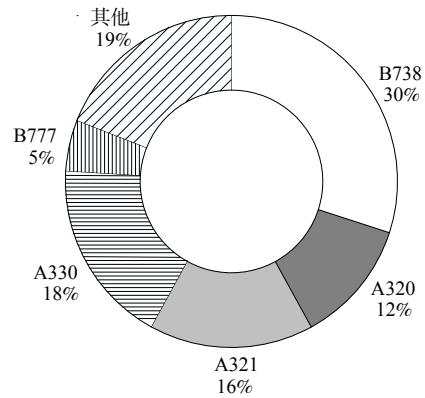
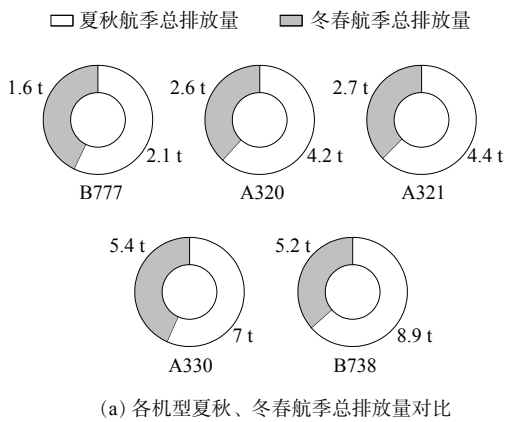
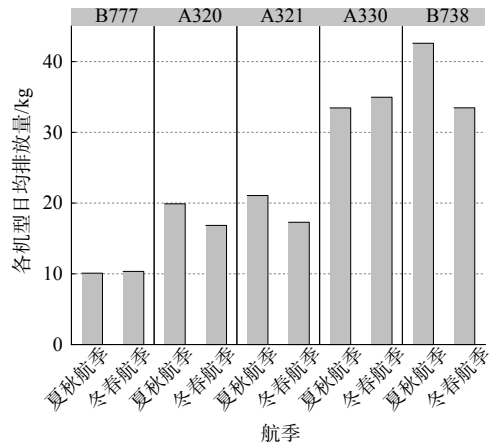


图 7 首都机场机型占比

Fig. 7 Proportion of types in Beijing Capital Airport



(a) 各机型夏秋、冬春航季总排放量对比



(b) 各机型夏秋、冬春航季日均排放量对比

图 8 首都国际机场不同航季 PM 总排放量及日均排放量

Fig. 8 Total PM emissions and daily emissions in different seasons of Beijing Capital International Airport

LTO循环颗粒物排量差异不大,但夏秋航季运行时间较长,也使得该类机型在夏秋季总排放量高于冬春航季,约为0.5、1.6 t。这些主要机型夏秋航季、冬春航季总排放量分别为26.7、17.4 t。这与韩博等^[24]对京津冀机场群排放清单的研究结果相近,这也从计算结果方面验证了本研究对 PM_{nvol} 改进计算方法的准确性。

为进一步研究不同航季民航飞机颗粒物排放的差异,计算了夏秋航季、冬春航季颗粒物日均排放量,主要机型A320、A321、B738的日均排放量差异显著,分别增加了3.1、3.8、9.7 kg。根据日均排放量及 PM_{nvol} 排放指数变化趋势,尽管 PM_{nvol} 排放指数存在冬春季高、夏秋季低的趋势,但夏秋航季环境气温较高,航空发动机为保持推力则需增加燃油流量,燃油流量的增加不仅影响了 PM_{nvol} 排放量,更直接导致 $PM_{vol-FSC}$ 与 $PM_{vol-FuelOrganics}$ 总排放量显著上升;对B777、A330等大推力机型则略有差异。这类机型在不同航季下的燃油流量差异较小,而由于冬春季的 PM_{nvol} 排放指数略高,使得这类机型在冬春航季的日均排放量较夏秋航季及单次LTO循环排放量略高。

3.3 不确定性分析

本研究中的不确定因素主要来自3个方面:一是在计算核心机黑碳浓度 C_{BC} 时,假定燃烧室内燃烧过程无传热损失且为定压过程,而实际传热效率为96%~98%,从而使得计算得到的主燃区温度比实际温度偏高,黑碳浓度 C_{BC} 略低;二是在对废气容积流量计算时,涵道比BRP选取的是ICAO排放数据库推荐值,与飞机运行中的实时值有差距,因而存在一定误差;三是挥发性硫酸盐颗粒物及挥发性有机颗粒物的排放指数来自ICAO推荐的标准值,该标准值为固定实验条件的数据,而实际运行中会随发动机实际推力、老化等其他条件影响而改变。

4 结论

1)结合飞机实际飞行数据,提出并利用改进的形成氧化方法,可更准确地估算核心机黑碳浓度 C_{BC} ,从而改进民航飞机LTO循环颗粒污染物排放计算模型。针对飞机LTO循环阶段,定量分析了B777、A320、A321、A330、B738飞机不同航季颗粒污染物排放指数及排放量变化趋势,建立的模型较好地呈现了不同航季下颗粒污染物排放变化趋势。

2)航空发动机在不同航季下LTO循环颗粒污染物排放量不同。对于A320、A321、B738等主流机型,在飞机发动机性能不发生退化、且起飞时采用全推力起飞的前提下, $PM_{vol-FSC}$ 与 $PM_{vol-FuelOrganics}$ 排放指数不发生变化,冬春航季 PM_{nvol} 排放指数较夏秋航季升高。这是因为夏秋航季气温高,在燃烧时空气、燃油的物理热较高,燃烧更完全,从而降低了 PM_{nvol} 排放指数,从生成机理上减少了 PM_{nvol} 的产生。但由于夏秋航季飞机燃油消耗率较高,最终导致夏秋航季单次LTO循环颗粒物排放量较冬春航季分别升高了18.6%、21.3%、17.7%。对于B777、A330等推力较大机型而言,不同航季燃油消耗率变化较小,冬春航季 PM_{nvol} 排放指数略高,夏秋航季、冬春航季单次LTO循环颗粒物排放量差异不大,降幅仅为约3%。

3)以北京首都国际机场为例,B777、A320、A321、A330、B738飞机夏秋航季较冬春航季排放量增加了0.5、1.6、1.7、1.6、3.7 t。其中,B738在不同航季下的日均排放差异最显著,约为9.7 kg。对实际运行条件下航空发动机颗粒污染物排放量的计算可真实有效地评估不同航季颗粒污染物排放的变化,为后续航空发动机实际运行过程中颗粒污染物排放监测提供参考。

参考文献

- [1] Airbus. Global market forecast 2017–2036, 2017[EB/OL]. <https://afngr.upo.com/en/global-market-forecast-2017-2036/> 排放量计算与分析[J]. 环境科学学报, 2018, 38(10): 3900-3904.
- [2] 曹惠玲, 汤鑫豪, 苗佳禾. 基于QAR数据的发动机LTO阶段氮氧化物 Final report of US Environmental Protection Agency Office of Air and
- [3] US EPA. The Benefits and Costs of the Clean Air Act: 1990 to 2020,

- Radiation[EB/OL]. 2011. <https://www.epa.gov/clean-air-act-overview/benefits-and-costs-clean-air-act-1990-2020-second-prospective-study>.
- [4] WHO. Health Risks of Particulate Matter from Long-range Transboundary Air Pollution[EB/OL]. (2006-01-01). 2006. <https://www.who.int/publications/i/item/E88189>
- [5] 中国民用航空局. 关于对《航空涡轮发动机及航空器排放规定》修订草案征求意见的通知[EB/OL]. (2020-11-16). http://www.caac.gov.cn/HDJL/YJZJ/202011/t20201116_205252.html
- [6] ICAO. Airport Air Quality Manual [R] Montreal: International Civil Aviation Organization, 2020.
- [7] 闫国华, 周利敏, 张青. 基于LTO循环的航空发动机颗粒物排放计算方法及应用[J]. *安全与环境学报*, 2016, 16(2): 246-249.
- [8] 魏志强, 王超. 航班飞行各阶段污染物排放量估算方法[J]. *交通运输工程学报*, 2010, 10(6): 48-52.
- [9] 孙见忠, 左洪福, 刘鹏鹏, 等. 航空发动机污染物排放量估算方法[J]. *交通运输工程学报*, 2012, 12(2): 53-61.
- [10] 韩博, 何真, 张铎, 等. 粤港澳大湾区飞机LTO污染排放因子及排放清单[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(12): 5182-5190.
- [11] YANG X W, CHENG S Y, LANG J L, et al. Characterization of aircraft emissions and air quality impacts of an international airport[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, 72(10): 198-207.
- [12] 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.
- [13] STETTLER M, EASTHAM S, BARRETT S. Air quality and public health impacts of UK airports. Part I: Emissions[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(31): 5415-5424.
- [14] STETTLER M, BOIES A M, PETZOLD A, et al. Global civil aviation black carbon emissions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(18): 10397-10404.
- [15] 曹惠玲, 李玉铭, 汤鑫豪. 基于QAR数据的飞机全航段黑碳排放量计算与分析[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(6): 1951-1957.
- [16] 曹惠玲, 晏嘉伟, 李玉铭. 结合QAR数据的全航段排放估算及其对飞行成本的影响研究[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(11): 4439-4448.
- [17] 孙志杰. 航空发动机燃烧室设计与优化方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020. DOI:10.27239/d.cnki.gnhhu.2020.001604.
- [18] 中国民用航空总局. 民用航空预先飞行计划管理办法[EB/OL]. (2006-04-03). http://www.gov.cn/gongbao/content/2007/content_621251.htm.
- [19] 杜方舟, 孙有朝, 郭媛媛, 等. 基于数据的航空发动机排气温度裕度及剩余寿命计算方法[J]. *航空动力学报*, 2020, 35(11): 2456-2464.
- [20] ICAO. Engine Exhaust Emission Data Bank[EB/OL]. <https://www.easa.europa.eu/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>.
- [21] 韩博, 王立婕, 赵芸婷, 等. 郑州新郑国际机场本地化排放因子与排放清单[J/OL]. *环境科学学报*: 1-11[2022-08-15]. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2022.0054.
- [22] 王瑞鹏, 周颖, 程水源, 等. 华北地区典型机场清单建立及空气质量影响[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(4): 1468-1476.
- [23] 曹惠玲, 苗佳禾, 苗凌云, 等. 基于实际飞行数据的首都机场飞机发动机日排放清单估算方法研究[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(8): 2699-2707.
- [24] 韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 等. 京津冀机场群飞机LTO大气污染物排放清单[J]. *环境科学*, 2020, 41(3): 1143-1150.

(责任编辑: 靳炜)

Studies on LTO cyclic particulate emission characteristics of civil aircraft in different flight seasons-A case study of Beijing Capital International Airport

QU Chungang*, KUANG Jiajun, YAN Jiawei

College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

*Corresponding author, E-mail: pqbird@sina.com

Abstract Particulate emissions from aircraft can cause environmental impacts. In order to evaluate the emission levels of particulate pollutants in different flight seasons, an improved calculation method based on black carbon formation oxidation method (FOX) was used to estimate the emission index of non-volatile particulate matter (PM_{nvol}). Engine parameters such as air flow and fuel flow in historical QAR data of B777, A320, A321, A330 and B738 were used to calculate the emission indices and emissions of particulate pollutants from multiple LTO cycles in different flight seasons. The results showed that when the air temperature in northern China increased significantly in summer compared with winter, although the PM_{nvol} emission index showed a downward trend, the particulate matter emission of A320, A321, B738 and other main aircraft increased significantly due to the influence of the increase in fuel consumption rate. The single LTO cycle in summer and autumn increased by 15.3 g, 13.8 g, 13.4 g compared with winter and spring, respectively, with an increase of 18.6%, 21.3% and 17.7%. The fuel consumption rate of B777 and other aircraft with large thrust had little change in summer and autumn and winter and spring, and the single LTO cycle particulate matter emissions in summer and autumn were slightly lower than that in winter and spring, with a decrease of only about 3%, about 4.1 g. Taking the actual take-off and landing data of Beijing Capital International Airport as an example, the total particulate emissions of the above main aircraft in summer and autumn increased by 0.5 t, 1.6 t, 1.7 t, 1.6 t and 3.7 t compared with winter and spring, respectively. The emission of particulate pollutants varied significantly among different aircraft types in different aviation seasons, and its influence could not be ignored. The analysis results of aircraft particulate emission characteristics in this study can provide a reference for the civil aviation industry to establish a complete emission inventory and achieve accurate control of aero-engine pollution.

Keywords aeroengine; Quick Access Recorder(QAR); pollutant emission characteristics; flight seasons; landing and take-off cycle(LTO) cycles