

夏卿,左洪福,杨军利. 2008. 中国民航机场飞机起飞着陆(LTO)循环排放量估算[J]. 环境科学学报, 28(7): 1469–1474

Xia Q, Zuo H F, Yang J L. 2008. Evaluation of LTO cycle emissions from aircraft in China's Civil Aviation Airports [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 28(7): 1469–1474

# 中国民航机场飞机起飞着陆(LTO)循环排放量估算

夏卿,左洪福\*,杨军利

南京航空航天大学民航学院,南京 210016

收稿日期:2007-06-11 修回日期:2007-10-17 录用日期:2008-05-06

**摘要:**为了估算飞机在民航机场的污染物( $\text{HC}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ )排放量,基于国际民航组织(ICAO)标准中的起飞着陆(LTO)循环概念,采用其发动机排放数据库(Engine emission data bank),结合我国民航机队资料和民航飞行数据,通过计算全国123个机场1周内飞机LTO循环的气体污染物排放量,拟合出LTO循环数与各种污染气体排放因子的关系。结果表明,2002~2006年民航机场LTO循环排放量分别为24680.54、24701.30、31084.55、35633.84、40645.55t;2006年我国全民航机场飞机LTO循环 $\text{HC}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 的排放量分别为1514.48、14341.16、23095.19、1694.71t,旅客吞吐量前20位的机场排放占全国排放总量的68.25%。考察对比了2003及2004年度全国7大空域的机场飞机LTO循环排放分布,结果表明,在标准LTO循环的进近、滑行、起飞以及爬升4种模式中,滑行段所排放的污染物约占整个循环的50%,滑行时间降低4min,排放总量降低6%。

**关键词:**民航;机场;LTO循环;排放

文章编号:0253-2468(2008)07-1469-06 中图分类号:X196 文献标识码:A

## Evaluation of LTO cycle emissions from aircraft in China's Civil Aviation Airports

XIA Qing, ZUO Hongfu\*, YANG Junli

Civil Aviation College of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016

Received 11 June 2007; received in revised form 17 October 2007; accepted 6 May 2008

**Abstract:** A calculation model of Landing and Take-Off (LTO) cycle emissions from aircraft in civil aviation airports was developed based on the ICAO's (International Civil Aviation Organization) standard LTO cycle and its engine emission data bank. The calculation used the fleet data and the flight data from civil aviation in China. Aircraft LTO emissions ( $\text{HC}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ) were calculated for one week at 123 airports and functional relationships between emissions and number of LTO cycles were developed. Total LTO emission from the aircraft is estimated to be 24680.54 t in 2002, 24701.3 t in 2003, 31084.55 t in 2004, 35633.84 t in 2005 and 40645.55 t in 2006. In 2006, the annual LTO cycle emissions of  $\text{HC}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  were 1514.48 t, 14341.16 t, 23095.19 t and 1694.71 t, respectively. Twenty of the 123 airports produced 68.25% of the total emissions. The distribution of LTO cycle emissions from aircraft in 7 civil aviation airspaces was investigated for the years 2003 and 2004. In a typical LTO cycle, including approach, taxi, take-off and climb, approximately half of these amounts are produced in the taxiing, and the estimations show that a 4 min decrease in taxiing time results in a 6% decrease in LTO emissions.

**Keywords:** civil aviation; airport; LTO cycle; emissions

### 1 引言(Introduction)

交通是空气污染的重要来源之一。公路、铁路、海运和空中交通的尾气排放促使酸雨的形成、损耗同温层的臭氧,并改变了气候(Colvile *et al.*, 2001),而飞速发展的航空运输业对环境的影响日趋突出(Joyce, 1999)。航空发动机对环境的影响主要表现

在高空飞行过程中的温室效应,而对地面空气污染来说,具有集中性和局部性的特点(吴寿生,1994)。发动机排放物对机场附近地面大气、环境和人类健康的影响是主要关注的问题(张彦仲,2001; Westerberg,2000)。因此,对飞机排放物的评估也从两方面进行,一是巡航状态的 $\text{NO}_x$ 排放情况评估(Gardner,1997; Ma *et al.*, 2000; 黄勇等,2000),二

基金项目:中国高技术研究发展计划(863)项目(No.2006AA04Z427)

Supported by the Hi-tech Research and Development Program of China(No.2006AA04Z427)

作者简介:夏卿(1975—),女,博士,E-mail:xiaqing\_75@163.com; \* 通讯作者(责任作者),E-mail:rms@nuaa.edu.cn

Biography: XIA Qing(1975—),female,Ph. D., E-mail:xiaqing\_75@163.com; \* Corresponding author,E-mail:rms@nuaa.edu.cn

是机场地面级别的污染气体排放量及排放影响评估(EPA, 1999; Perl *et al.*, 1997; Kalivoda *et al.*, 1997; 1995; Kesgin, 2006; Romano *et al.*, 1999).

美国环保署 EPA(1999)在亚音速商业喷气式飞机的排放污染评估报告中指出,到2010年飞机污染气体在机场的排放量会急剧上升,并根据1990年来的污染气体排放数据预测了1990~2010年间排放的长期增长趋势. Perl等(1997)使用环境评估技术对里昂-桑托拉斯机场1987、1990、1994和2015年的民航空气污染成本进行了评估,获得了基于地面级别的与飞机工作状态有关的排放清单. Kalivoda等(1995, 1997)在MEET计划中回顾总结了飞机排放评估方法,结合空中交通数据、机场数据、飞行路线、飞机/发动机性能数据和排放因子将飞机发动机排放分成发动机启动、滑出、起飞、爬升、巡航、下降、着陆、滑进、地面状态9个阶段进行了评估,并对2010年和2020年飞机排放物进行了预测. Kesgin(2006)计算出了2001年土耳其机场的飞机污染气体排放量.由于空中交通对大气的影响非常不确定,Romano等(1999)针对不同型号飞机的污染物排放进行了计算方法的比较.

开发与建立污染物排放清单是了解和评价污染状况、进行环境模拟、制定相关标准和污染控制对策的基本和有效手段之一.而航空排放因其特殊的工作状态导致其污染的空间垂直分布显著有别于其它固定源和地面交通等.因此,研究工作对建立机场大气污染物排放清单,评价机场地面环境污染状况及制定相关对策以减少飞机排放具有很好的理论和现实参考价值.

## 2 计算方法(Calculation Method)

### 2.1 原理

飞机在机场的全部活动可以由LTO循环描述. LTO循环是飞机从高空降落至机场又重新起飞至高空的一个封闭工作过程.国际民航组织(ICAO)规定,一个理想的LTO循环包括4个工作状态:进近、滑行、起飞和爬升,并且将爬升定义为起飞结束到飞机冲出大气边界层.本研究中采用ICAO规定的标准LTO循环,定义的排放是从地表到大气边界层顶部高度915m(3000英尺)的地方,不考虑巡航条件下的飞机发动机排放.

依据LTO循环可以计算飞机在机场的排放.对于某种型号的飞机,其发动机在每种工作状态都运

行在1个相对标准的推力设置下;通过不同推力下特定飞机发动机排放因子可计算飞机在整个循环内的污染物排放.如果可以确定循环数,即飞机在机场的所有活动,就可以计算全部的污染物排放量.因此,影响飞机在机场LTO循环排放总量的所有决定性因素有:①飞机类型,即航空公司的机队组成,以及其飞机/发动机匹配情况.②飞机发动机类型,飞机发动机在燃烧燃油产生动力的过程中排出污染物,是污染物的源头.污染物排放取决于燃油燃烧效率和发动机特定的设计因素.③飞机排放污染物本身的排放特征,包括排放因子的确定以及排放指数.④飞机发动机工作模式,包括推力的设置和运行的时间.⑤飞机在机场的活动,即飞机在机场的LTO循环数.

### 2.2 改进

国际上一般的计算方法是通过记录飞机在机场1年的飞行活动数据,来建立其1年LTO循环排放清单.这种以年以单架飞机为单位来计算的方法,处理数据繁多且庞杂.本研究结合民航班机以1周为周期的航班时刻特征,不考虑临时航班的变化,将所需处理的数据从1年精简为1周;并鉴于我国在此方面研究数据的缺乏、飞机/发动机匹配复杂等情况,将对单架飞机的计算改为对某航空公司机队某型飞机的跟踪,以其平均排放因子为计算依据,结合EPA(1999)的排放评估报告内容以及Kesgin(2006)计算土耳其机场飞机污染排放的公式,得出以下改进后的计算公式.

### 2.3 公式

飞机污染气体排放总量计算公式如下.

$$E_t = \sum_i \sum_m E_{i,m} \quad (1)$$

式中, $i$ 为污染物类型; $m$ 为发动机工作模式; $E_{i,m}$ 为*i*污染物在*m*模式的1周排放量(kg), $E_t$ 为污染物1周排放总量(kg).

飞机污染气体排放量计算公式:

$$E_{i,m} = \sum_a \sum_e n_a l_{a,e} F_{a,e,m} E_{a,e,m,i} t_{m,a} \quad (2)$$

式中, $a$ 为飞机类型; $e$ 为航空公司; $n_a$ 为*a*型飞机的发动机数量(台); $l_{a,e}$ 为*e*航空公司*a*型飞机的1周LTO循环数; $F_{a,e,m}$ 为*e*航空公司*a*型飞机在*m*工作模式下的燃油消耗率( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ); $E_{a,e,m,i}$ 为*e*航空公司*a*型飞机在*m*工作模式下污染物*i*的排放因子( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); $t_{m,a}$ 为*a*型飞机在*m*模式的工作时间(s),其它符号与上面公式相同.

燃油消耗率计算公式如下.

$$F_{a,e,m} = \frac{1}{A} \sum_j K_j F_{j,m,i} \quad (3)$$

式中,  $A$  为  $e$  航空公司  $a$  型飞机总架数;  $j$  为发动机类型;  $K_j$  为  $e$  航空公司  $a$  型飞机配  $j$  型发动机的架数;  $F_{j,m,i}$  为  $j$  型发动机在  $m$  工作模式下的燃油消耗率 ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 数据来自 ICAO 的发动机排放数据库; 其它符号与上面公式相同. 此公式是按航空公司同一机型的不同发动机组成进行加权平均, 计算公式(2) 中所需某航空公司某型飞机的平均燃油消耗率.

排放因子计算公式如下.

$$E_{a,e,m,i} = \frac{1}{A} \sum_j K_j E_{j,m,i} \quad (4)$$

式中,  $E_{j,m,i}$  为  $j$  型发动机在  $m$  工作模式下的污染物  $i$  的排放指数 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 数据来自 ICAO 的发动机排放数据库; 其它符号与上面公式相同. 此公式是按航空公司同一机型的不同发动机组成进行加权平均, 计算公式(2) 中所需某航空公司某型飞机的平均排放指数.

### 3 数据来源及参数确定 (Data source and parameter determination)

至 2005 年底, 全国民用航空运输机场共有 142 个. 定期通航机场 135 个 (中国民航总局规划发展财务司, 2005). 2006 年民航各运输机场旅客吞吐量前 20 名依次为北京、上海浦东、广州、上海虹桥、深圳、成都、昆明、杭州、西安、重庆、厦门、青岛、海口、长沙、大连、南京、武汉、沈阳、乌鲁木齐、桂林, 飞机起降架次排名略有不同. 这 20 个机场的旅客吞吐量占全国总量的 78%, 飞机起降架次占全国总量

的 68%.

中国民航在役飞机机型种类繁多, 主流机型是波音公司系列以及空客系列. 飞机型号与发动机型号并非完全一一对应, 例如 A319 在中国民航各航空公司机队中匹配有 6 种不同型号的发动机. 而同一航空公司的同一机型其发动机类型也并非唯一. 航空器型号与发动机匹配数据来源于中国民航总局航空器的适航审定部门年度报告, 时间截止到 2006 年 12 月 31 日.

本研究中, 进近、滑行、起飞和爬升时间取自 ICAO 规定的标准 LTO 循环, 其工作状态、推力和运行时间如表 1 所示. 飞机在每种工作模式下的燃油消耗和排放指数取自于国际民航组织的发动机排放数据库. 除了 ICAO 数据库中的污染成分 HC、CO、NO<sub>x</sub>, 通常还包括 SO<sub>2</sub>. 在评估硫的排放时, 我们通常假定燃油中的硫在燃烧过程中全部与氧结合产生 SO<sub>2</sub>. 因此, SO<sub>2</sub> 的排放依赖于燃油成分, 其排放指数与发动机性能无关, 这里根据 Kalivoda 的 MEET 计划暂取为 1 g·kg<sup>-1</sup> (Kalivoda et al., 1997). 民航发动机排放数据库见表 2.

表 1 ICAO 规定的标准 LTO 循环下发动机推力设置和发动机不同工作状态的时间

Table 1 Standard LTO cycle in terms of thrust settings and time spent in the specific modes

发动机工作状态	推力设置	工作时间/min
起飞	100%	0.7
爬升	85%	2.2
进近	30%	4.0
滑行/慢车	7%	26.0

表 2 民用客机发动机排放指数表(部分)

Table 2 Index of emissions from commercial aircraft used for civil aviation

发动机型号	运行模式	燃油流量 / (kg·s <sup>-1</sup> )	HC /(g·kg <sup>-1</sup> )	CO /(g·kg <sup>-1</sup> )	NO <sub>x</sub> /(g·kg <sup>-1</sup> )	SO <sub>2</sub> /(g·kg <sup>-1</sup> )
AE3007A1	起飞	0.3826	0.221	0.77	19.66	1
	爬升	0.3180	0.257	0.96	16.63	1
	进近	0.113	0.655	3.91	7.10	1
	滑行/慢车	0.0461	3.818	23.73	3.47	1
CF6-80C2A5	起飞	2.5810	0.070	0.52	34.38	1
	爬升	2.0820	0.080	0.52	22.86	1
	进近	0.6870	0.200	1.93	9.11	1
	滑行/慢车	0.2070	8.990	41.65	3.79	1
CF6-80C2-B6	起飞	2.5790	0.070	0.52	30.81	1
	爬升	2.0810	0.080	0.52	22.94	1
	进近	0.6860	0.200	1.93	9.11	1
	滑行/慢车	0.2070	8.990	41.66	3.79	1

利用航空器与发动机匹配数据,结合 ICAO 的发动机排放数据库中相对应的发动机燃油消耗率和排放指数值,按航空公司同一机型的不同发动机组成进行加权平均,根据式(3)、式(4)计算得到某航空公司某型飞机的平均燃油消耗率和排放因子;再根据 1 周航班流量表,按上述公式(2)计算得到中国民航机场飞机 LTO 循环污染气体排放量;最后按公式(1)计算得到污染物排放总量。用 Delph 语言编

程,所有计算由计算机程序完成。

#### 4 结果(Results)

##### 4.1 拟合结果

通过对全国 123 个机场 1 周排放量进行计算,得出 LTO 循环数与各种排放因子的拟合关系(见图 1)。

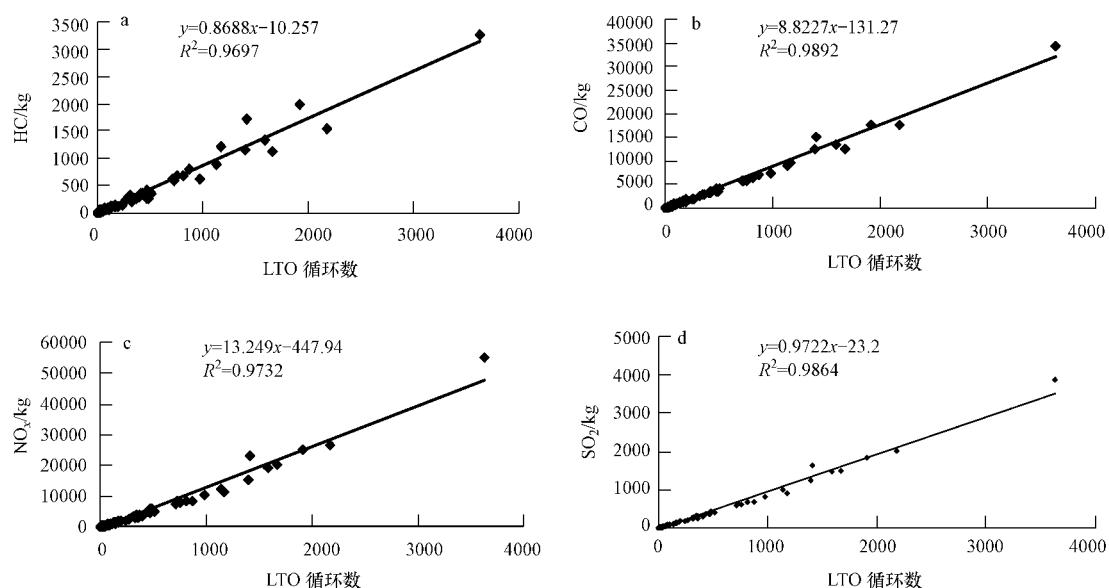


图 1 HC、CO、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$  排放量与 LTO 循环数的关系图(一周)

Fig. 1 HC, CO,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  emissions as a function of the number of LTO cycles (one week)

#### 4.2 2002~2006 年排放清单

我国的航空运输业发展飞速,2002~2006 年,旅客吞吐量从 171373468 人次增加到 331973261 人次,年增长率分别为 0.08%、38.8%、17.5% 和 16.7%,相应的污染物增长率为 0.08%、25.8%、14.6%、14.0% (2003 年由于 SARs 的影响,基本与

2002 年持平)。民航的飞速发展导致机场污染物的排放迅速增加,环境问题日益突出。2002~2006 年民航机场 LTO 循环年排放清单见表 3。2006 年,旅客吞吐量占前 20 位机场的 HC、CO、 $\text{NO}_x$  和  $\text{SO}_2$  的排放总量是 27742.41t,占全国排放总量的 68.25%。2006 年污染物排放清单见表 4。

表 3 2002~2006 年民航机场飞机年 LTO 循环排放清单

Table 3 Inventory of the annual LTO cycle emissions from aircraft in civil aviation airports from 2002~2006

年份	HC/t	CO/t	$\text{NO}_x$ /t	$\text{SO}_2$ /t	总量/t	总量增减率
2002	919.62	8708.19	14023.68	1029.05	24680.54	
2003	920.39	8715.51	14035.48	1029.92	24701.30	0.08%
2004	1158.23	10967.73	17662.52	1296.07	31084.55	25.84%
2005	1327.74	12572.87	20247.48	1485.75	35633.84	14.64%
2006	1514.48	14341.16	23095.19	1694.71	40645.55	14.06%

表4 民航机场2006年飞机LTO循环污染物排放清单

Table 4 Inventory of the annual number of LTO cycles and associated emissions from civil aviation aircraft at each airport investigated in 2006

机场	年 LTO 循环	HC/t	CO/t	NO <sub>x</sub> /t	SO <sub>2</sub> /t	总量/t	各机场贡献率
首都机场	170841	164.58	1558.42	2509.50	184.15	4416.65	10.87%
上海浦东	102523	100.77	954.18	1536.40	112.75	2704.09	6.65%
广州白云	105655	100.95	955.86	1539.11	112.95	2708.87	6.66%
上海虹桥	84979	77.15	730.53	1176.24	86.32	2070.24	5.09%
深圳宝安	75715	73.62	697.08	1122.36	82.37	1975.42	4.86%
成都双流	66451	67.53	639.45	1029.56	75.56	1812.10	4.46%
昆明巫家坝	54518	58.88	557.55	897.66	65.88	1579.97	3.89%
杭州萧山	39631	43.78	414.51	667.30	48.98	1174.55	2.89%
西安咸阳	45686	43.13	408.40	657.46	48.25	1157.25	2.85%
重庆江北	36337	38.62	365.68	588.66	43.21	1036.17	2.55%
厦门高崎	33507	33.59	318.07	511.99	37.58	901.23	2.22%
青岛流亭	31413	31.27	296.07	476.57	34.98	838.89	2.06%
海口美兰	34440	26.81	253.83	408.54	29.99	719.16	1.77%
长沙黄花	29767	30.89	292.50	470.81	34.56	828.76	2.04%
大连周水子	25194	24.48	231.76	373.00	27.38	656.62	1.62%
南京禄口	27754	28.05	265.56	427.44	31.37	752.42	1.85%
武汉天河	25897	29.04	274.96	442.57	32.49	779.06	1.92%
沈阳桃仙	21536	21.25	201.15	323.70	23.76	569.85	1.40%
乌鲁木齐	24458	22.41	212.13	341.39	25.06	600.99	1.48%
桂林两江	17009	17.16	162.43	261.35	19.19	460.12	1.13%
其它	474954	480.54	4551.03	7333.61	537.95	12903.13	31.75%
合计	1528261	1514.48	14341.16	23095.19	1694.71	40645.55	100.00%

#### 4.3 地区排放分布

中国民航总局将全国的民航业分为七大地区航空管理局,分别是:华北、东北、华东、中南、西南、西北以及新疆。根据民航总局生产统计公报,得出2003及2004年七大空管领域机场LTO循环年排放分布,见图2。由图可见,污染物排放集中在华东与中南地区,占全部总量的60%,华北、东北、西南、西北、新疆分别为14%、5%、13%、4%、2%。

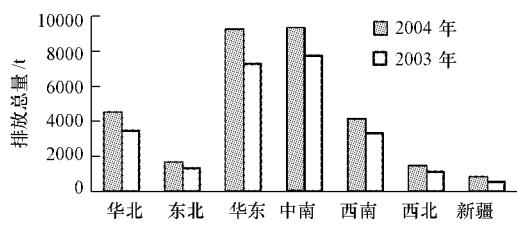


Fig. 2 The distribution of emissions of 7 civil aviation airspaces in 2003 and 2004

#### 4.4 LTO循环各阶段排放分布

飞机发动机在LTO循环的4个模式中,起飞、爬升、进近与滑行模式气体污染物排放各占总量的

13.27%、28.16%、9.81%与48.75%,其中爬升与滑行段所排污染物较多。而各污染物在总量中所占比例分别为3.85%、38.60%、53.46%与4.10%。

#### 4.5 滑行时间影响分析

飞机处于滑行/慢车状态工作模式下排出将近50%的污染物,比其它的飞机在机场的工作状态每消耗单位燃油产生更多的排放。说明发动机在低推力状态下工作,排放指数较高。我们以北京首都机场的数据为例,考察了滑行时间的变化对污染物排放的影响。结果显示,当滑行时间从26min降至22min时,气体污染物总量降低了6%。因此,从环境的观点出发,机场可以改进滑行路线,提供更为快速与直接的路线以减少排放。

#### 5 讨论(Discussion)

首先,由于本文的估算建立在国际标准LTO循环下,这是对实际情况的一种理想平均。飞机在实际飞行中,每种工作模式的燃油消耗率、排放指数和时间与标准LTO循环是不尽相同的,而与飞机型号、气象条件和机场的具体工作条件有关。ICAO中的发动机排放因子是发动机生产商在取得生产证

明的过程中,在海平面静态条件下用发动机测试台完成的测量数据,与飞行条件下的实际测量数据差别很多,而在飞行条件下的实时监测还是个很难克服的问题。也就是说,污染物排放指数与标准LTO循环相比是有变化的,与实际工作条件密切相关,其实时监测与变化关系是今后所要研究的问题。

其次,由于国外航空公司飞机机型及其飞机/发动机匹配资料的缺乏,本研究中暂未考虑国外航空公司在民航机场的排放,而且在计算2002~2005年的污染物排放量时忽略了机队变化所带来的影响,这些都需要在今后的工作中进一步完善。

飞机排放污染的问题包括地面级别与巡航高度两方面的研究,国外业内人士在这个领域已做了大量的研究工作;但在国内这个问题的研究却刚刚起步,尤其在地面级别方面本研究工作具有开拓性意义。机场飞机LTO循环排放量的预估是飞机对机场环境影响评估的基础性工作,对地面集中性区域的环境影响有待进一步深入研究。

**责任作者简介:**左洪福(1959—),男,教授。长期从事航空发动机维修与故障诊断、可靠性及后勤保障的研究工作。

#### References:

- Colvile R N, Hutchinson E J, Mindell J S, et al. 2001. The transport sector as a source of air pollution[J]. *Atmospheric Environment*, 35(9):1537—1565
- CAAC. 2003. Statical Data on Civil Aviation of China 2003[M]. Beijing: China Civil Aviation Publishing House, 104—140 (in Chinese)
- CAAC. 2004. Statical Data on Civil Aviation of China 2004[M]. Beijing: China Civil Aviation Publishing House, 105—140 (in Chinese)
- CAAC. 2005. Statical Data on Civil Aviation of China 2005[M]. Beijing: China Civil Aviation Publishing House, 105—140 (in Chinese)
- EPA. 1999. Evaluation of Air Pollutant Emissions from Subsonic Commercial Jet Aircraft[R]. EPA420-R-99-013. Michigan: EPA, 1—10
- Gardner R M. 1997. The ANCAG/EC Global Inventory Of NO<sub>x</sub> Emissions from Aircraft[J]. *Atmospheric Environment*, 31(12): 1751—1766
- Huang Y, Zhou G L, Wu S S. 2000. A preliminary investigation on the inventory of NO<sub>x</sub> emitted from CAAC flights over China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 27(3):179—182 (in Chinese)
- Huang Y, Wu D Y, Wang J T, et al. 2001. Further Assessment of the NO<sub>x</sub> emission from CAAC fleet over China[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 27(3): 289—292 (in Chinese)
- Kalivoda M T, Kudrna M. 1997. Methodologies for estimating emissions from air traffic: future emissions[R]. MEET Project ST-96-SC.204, Vienna, Austria: Perchtoldsdorf-Vienna, 46—53
- Kalivoda M T, Feller R. 1995. ATEMITS-A tool for calculating air traffic exhaust emissions and its application[J]. *The Science of the Total Environment*, 169(1-3):241—247
- Kesgin U. 2006. Aircraft emissions at Turkish airports[J]. *Energy*, 31(2-3):372—384
- Ma J Z, Zhou X J. 2000. Development of a three-dimensional inventory of aircraft NO<sub>x</sub> emissions over China[J]. *Atmospheric Environment*, 34(3): 389—396
- Penner J E, Lister D H, Lister D J, et al. 1999. Aviation and the Global Atmosphere[R]. 92-9169. Geneva Switzerland: IPCC, 3—9
- Perl A, Patterson J, Perez M. 1997. Pricing aircraft emissions at LYON-SATOLAS airport[J]. *Transport Res(Part D)*, 2(2): 89—105
- Romano D, Gaudioso D, Lauretis R. 1999. Aircraft emissions: a comparison of methodologies based on different data availability[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 56: 51—74
- Westerberg J. 2000. Air transport system sensibilities[J]. *Air & Space Europe*, 2(3): 38—40
- Wu S S. 1994. Emission Control of Aircraft Engine[J]. *International Aviation*, 9:51—53 (in Chinese)
- Zhang Y Z. 2001. Aviation environment engineering and science[J]. *Engineering Science*, 3(7):1—6 (in Chinese)

#### 中文参考文献:

- 黄勇,周桂林,吴寿生.2000.中国上空民航飞机NO<sub>x</sub>排放量及其分布初探[J].*环境科学学报*,20(2):179—182
- 黄勇,吴冬莺,王金涛,等.2001.中国上空民航飞机NO<sub>x</sub>排放分布再探[J].*北京航空航天大学学报*,27(3):289—292
- 吴寿生.1994.飞机发动机排气污染控制[J].*国际航空*,9:51—53
- 张彦仲.2001.航空环境工程与科学[J].*中国工程科学*,3(7):1—6
- 中国民用航空总局规划发展财务司.2003.从统计看民航(2003)[M].北京:中国民航出版社,104—140
- 中国民用航空总局规划发展财务司.2004.从统计看民航(2004)[M].北京:中国民航出版社,105—140
- 中国民用航空总局规划发展财务司.2005.从统计看民航(2005)[M].北京:中国民航出版社,105—140