DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2024.0046
徐鑫,尤倩,张峥, 等.2024.碳达峰情景下中国民用航空机场大气污染物及碳排放清单研究[J].环境科学学报,44(7):428-437
XU Xin, YOU Qian, ZHANG Zheng, *et al*.2024.Air pollutants and carbon emission inventory of civil aviation airports in China in the scenario of peak carbon dioxide emissions[J].Acta Scientiae Circumstantiae,44(7):428-437

碳达峰情景下中国民用航空机场大气污染物及碳排放清单研究

徐鑫[1,2],尤倩[3],张峥[1,2],张苾茹[1],伯鑫[1,2,*],王昭桐[1,2]

1. 北京化工大学环境科学与工程系,北京 100029
2. 北京化工大学北化中国工业碳中和研究院,北京 100029
3. 首都经济贸易大学管理工程学院,北京 100070

摘要:基于2021—2022年中国民航局发布的机队配置数据和飞机起飞降落的航班数据,利用国际民航组织(ICAO)提供的标准排放量模型,自下而上编制了2021年及2022年中国大陆(不含港澳台地区)民用航空机场高分辨率LTO循环过程的大气污染物及碳排放清单(HC、NO_x、CO、PM、SO_2、CO_2),并开展了污染物排放特征分析.此外,对民用航空机场开展了"碳达峰"情景下不同低碳路径的分析研究,设定并分析了基准情景、飞机性能优化情景和替代燃料情景,以期寻求"碳达峰"情景下机场减污降碳的最佳路径.结果表明,2022年中国民航机场LTO循环NO_x、CO、HC、SO_2、PM和CO_2排放量分别为7.80×10^4、6.17×10^4、0.51×10^4、0.23×10^4、0.06×10^4、1079.60×10^4 t,相比于2021年,2022年中国民航飞机LTO循环大气污染物及碳排放总量降低了26.41%.2021年华东地区的CO_2排放量最高,在总排放量中占比达25.94%,而2022年中南地区的CO_2排放量最高,占总排放量的27.03%.与其他两个情景相比,替代燃料情景到2030年累计碳排放量为16784.48×10^4 t,减排效率最高,达到28.35%.因此,"碳达峰"情景下民用航空机场减污降碳的最佳路径为选用替代燃料技术.研究结果有助于厘清中国民用航空机场大气污染物及碳的排放特征,为机场实时监管提供数据支持,并为探索有效的航空业减污降碳实施路径提供新思路.

关键词:民用航空机场;LTO循环;排放清单;减污降碳;碳达峰

文章编号:0253-2468(2024)07-0428-10　　**中图分类号**:X51　　**文献标识码**:A

Air pollutants and carbon emission inventory of civil aviation airports in China in the scenario of peak carbon dioxide emissions

XU Xin[1,2], YOU Qian[3], ZHANG Zheng[1,2], ZHANG Bidi[1], BO Xin[1,2,*], WANG Zhaotong[1,2]

1. Department of Environmental Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029
2. BUCT Institute for Carbon-neutrality of Chinese Industries, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029
3. School of Management and Engineering, Capital University of Economics and Business, Beijing 100070

Abstract: Using fleet configuration data and aircraft landing and take-off (LTO) data of the Civil Aviation Administration of China in 2021 and 2022, this study adopted the standard emission model provided by International Civil Aviation Organization (ICAO) to develop a bottom-to-top air pollution and CO_2 emission inventory (HC, NO_x, CO, PM, SO_2, and CO_2) of the LTO cycle of civil aviation airports in the Chinese mainland (excluding Hong Kong, Macao, and Taiwan) and analyzed the pollutant emission characteristics. Additionally, baseline, aircraft performance optimization, and alternative fuel scenarios were set and compared to determine the optimal path of airport operation in the scenario of peak carbon dioxide emissions. Results showed that NO_x, CO, HC, SO_2, PM, and CO_2 emissions in the LTO cycle of China's civil aviation airports in 2022 were 7.80×10^4, 6.17×10^4, 0.51×10^4, 0.23×10^4, 0.06×10^4 and 1079.60×10^4 t, respectively. Compared with that in 2021, the total emission of air pollutants and CO_2 in the LTO cycle decreased by 26.41% in 2022. In 2021 (2022), eastern (central and southern) China had the highest CO_2 emissions, accounting for 25.94% (27.03%) of the total. Of the three scenarios, the alternative fuel scenario is projected to provide the highest emission reduction efficiency of 28.35%, with a cumulative carbon emission of 167.8448×10^6 tons by 2030. Therefore, in the scenario of peak carbon dioxide emissions, the optimal path for civil aviation airports to reduce pollution and carbon is to choose alternative fuel technology. The research results of this study help clarify the emission characteristics of air pollutants and CO_2 in China's civil aviation airports, support real-time airport supervision, and provide new ideas for

收稿日期:2023-12-29　　**修回日期**:2024-02-02　　**录用日期**:2024-02-05

基金项目:国家自然科学基金(No.72174125);中央高校基本科研业务费资助项目(No.buctrc202133);环境模拟与污染控制国家重点联合实验室(清华大学)专项经费资助项目(No.22K07ESPCT)

作者简介:徐鑫(1998—),女,E-mail:xuxin04210202@163.com; * **责任作者**,E-mail:boxin@buct.edu.cn

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

exploring effective strategies for reducing air pollution and carbon in the aviation industry.

Keywords: civil aviation airport; LTO cycle; emission inventory; reduction of pollution and carbon emissions; peak carbon dioxide emissions

1　引言(Introduction)

随着全球经济的快速增长和技术的不断进步,民用航空的需求不断增长(CAAC, 2020),与此同时,航空业发展带来的大气污染物及碳排放量迅速增加.据报道,近几十年来航空业CO_2排放量约占全球CO_2排放总量的2%,其增长速度超过了公路、铁路和航运(IEA, 2022).因此,在碳达峰背景下,建立高分辨率的大气污染物及碳排放清单对减少大气污染物排放和民航实现低碳转型至关重要.

机场清单的计算一般以国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)划分的两个标准化循环阶段来开展.ICAO将飞机单次起降活动的全过程定义为一次LTO(Landing and Take-off)循环,包括起飞、爬升、进近和滑行4个阶段(Galant-Gołębiewska *et al.*,2021).由于LTO阶段飞行距离较短,单位里程排放量最大,相应地,其对低空大气环境的负面影响更为突出(Bo *et al.*, 2019).因此,近年来机场大气污染物排放清单大多采用ICAO推荐的标准起降模型来计算LTO循环阶段的大气污染物及碳排放量,并开展污染物排放特征分析和排放因子本地化工作.例如,韩博等(2020a;2020b)通过将ICAO的排放因子本地化,接连编制了京津冀、粤港澳大湾区等多个区域机场的大气污染物排放清单,明确了不同飞行阶段各种污染物的排放特征.王瑞鹏等(2020)通过对LTO循环阶段飞机不同工作状态下的时间进行修正,利用AMDAR数据确定大气混合层高度,核算了2017年华北地区6座机场的排放清单.尤倩等(2022)收集了中国民用航空机场相关数据,建立了LTO循环大气污染物及碳排放清单,分析了污染排放的时空特征.尽管近年来针对机场大气污染物排放清单的研究取得了一定的成果,然而,在碳达峰背景下,机队规模、机场数量及客运量需求稳步增长,民航机场大气污染物及碳排放量也随之增长.因此,为准确评估航空活动对空气质量的影响和探索碳达峰背景下的最佳减排路径,需要建立中国民用航空机场高分辨率大气污染物及碳排放清单.

此外,在全球范围倡导减少碳排放、全力发展低碳经济的大背景下,2021年12月27日,民航局印发的《"十四五"民航绿色发展专项规划》(http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/FZGH/202201/t20220127_211345.html)为民航绿色发展明确了方向和任务.将绿色低碳发展贯彻到民航发展的总体战略目标,基于现有的技术和设备水平,分析不同情景下大气污染物及碳排放量,从而得到最佳绿色低碳发展路径,是2030年实现"碳达峰"的重要一环.当前,为推动航空业减污降碳的实施进度,基于现有的技术水平,未来可以从飞机本身优化入手:一方面,可以研发燃烧效率更高的可持续燃料(张玉玺, 2013),对发动机涵道比、材料和风扇叶片等方面进行优化改进(闫泽辉, 2020),从而提高飞机性能;另一方面,通过研发纯电动飞机(杨凤田等, 2021)、混合电力系统飞机(李也, 2021)、太阳能电池飞机(张利国等, 2018)及燃料电池飞机等电动飞机(Roessler *et al.*, 2012),从而大量减少化石燃料的使用,降低民航业大气污染物及碳的排放.

基于上述背景,本研究根据中国民航局发布的《从统计看民航2021》及《从统计看民航2022》中的机队配置数据(CAAC, 2021; 2022),利用ICAO提供的标准排放量模型和机场飞机起飞降落的航班架次数量,计算中国民用飞机平均大气污染物排放因子,核算飞机LTO循环阶段的主要排放数据,编制2021年及2022年中国大陆(不包括港澳台)民用航空机场LTO循环过程的大气污染物及碳排放清单(HC、NO_x、CO、PM、SO_2、CO_2),并开展时空特征分析.此外,基于2030年"碳达峰"情景,开展我国民用航空机场的减污降碳路径研究,并设定基准情景、飞机性能优化情景和替代燃料情景,对机场减污降碳路径进行量化分析.以期寻求"碳达峰"情景下机场减污降碳的最佳路径,为我国航空业的减污降碳提供参考.

2　材料与方法(Materials and methods)

2.1　数据来源

本研究分别收集了2021及2022年全国254个运输机场的数据,研究范围覆盖全国31个省份、直辖市、自治区(中国香港、澳门和台湾暂不纳入本文的研究范围).飞机起降数据参考中国民用航空局提供的数据;全国飞机机队配置参考中国民用航空局的出版物《从统计看民航2021》及《从统计看民航2022》(CAAC,

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2021；2022)；机型与发动机的匹配数据通过搜索查找飞机制造公司的官方网站和相关文献获取(朱佳琳等，2020)；发动机的燃油消耗率、排放因子和烟度数据来源于ICAO飞机发动机排放数据库(ICAO，2023)．本研究主要探究LTO循环的HC、NO_x、CO、PM、SO_2和CO_2排放．

2.2 大气污染物排放量计算方法

机场区域超过80%的大气污染排放来自飞机的LTO循环阶段的排放尾气，低于20%的排放来自飞机的APU辅助动力装置与GSE地面支持装置(韩博等，2020a；2020b)，故本研究主要集中于飞机的LTO循环阶段．由于我国的飞机机群配置相当复杂，机型众多，且并非所有机型与发动机都能完全匹配，导致全国各机场的各型飞机起降数据难以获取．根据文献可知，通过使用ICAO的标准排放模型和统计机场飞机的起降次数，可计算中国飞机的平均大气污染物排放因子，该方法已在多个项目中成功应用且效果良好(宋利生，2013；ICAO，2023)．因此，本文基于机型配置数据，计算加权排放因子来核算全国机场LTO循环阶段的大气污染物及碳排放量．由于我国飞机机群配置的年度变化幅度并不大，所以本研究假设每架飞机的起降概率相同，依据各机型占比(表1和表2)及ICAO排放因子数据库给出的排放因子(ICAO，2023)，计算飞机LTO循环阶段的大气污染物加权排放因子和航空煤油的加权消耗率．2021年我国航空运输飞机共注册了3903架，其中纳入本研究计算排放因子核算的机型数量占比98.95%；类似地，2022年我国航空运输飞机共注册了4054架，其中纳入本研究计算排放因子核算的机型数量占比96.62%．此外，各污染物加权排放因子、加权燃油消耗率、烟度及大气污染物及碳(HC、NO_x、CO、PM、SO_2、CO_2)排放量的计算公式参考本团队之前发表的研究成果(尤倩等，2022)．

表1 2021年中国全行业运输飞机架数及占比

Table 1 The number and proportion of transport aircraft in China's entire industry in 2021

机型	期末架数/架	发动机	比例	机型	期末架数/架	发动机	比例
B737-800	1186	CFM56-7B24	30.39%	B787-8	26	GEnx-1B	0.67%
A320	795	V2527-A5	20.37%	B777F	30	GE90-77B	0.77%
A321	333	CFM56-5B3/3	8.53%	A321NEO	81	CFM56-5B3/3	2.08%
A319	170	CFM56-5B7/P	4.36%	B747-400F	13	PW4056	0.33%
B737-700	135	CFM56-7B22	3.46%	A350-900	34	Trent XWB-84	0.87%
A330-300	134	Trent 700	3.43%	B737-300F	71	CFM56-3B	1.82%
A330-200	105	Trent 700	2.69%	EMB-145	8	AE3007A1	0.20%
EMB-190	88	AE3007A1	2.25%	B747-8	7	GEnx-2B	0.18%
B737MAX8	97	LEAP-1B	2.49%	A300-600F	6	CF6-80C2A8	0.15%
B777-300ER	63	GE90-115BL	1.61%	B737-900ER	6	CFM56-7BE	0.15%
B787-9	81	GEnx-1B	2.08%	A380	5	Trent 900-84	0.13%
B737F	71	CFM56-7B22	1.82%	B767-300F	8	CF6-80C2A1	0.20%
A320NEO	250	PW1100G-JM	6.41%	B737-900	5	CFM56-7B27	0.13%
B757-200F	54	RB211-535E4	1.38%	其他	41	-	1.05%

2.3 情景设置

由于机场所排放的大气污染物及碳主要来源于飞机起降过程中航空燃油的消耗，因此，本研究以航空燃油消耗产生的碳为例进行减污降碳措施的分析．受机队类型差异及成本、技术成熟度的影响，2023—2030年机队配置不会有太大的变化，仍以上一代际机型为主．考虑到航空部门目前的排放控制措施和航空部门的“碳达峰和碳中和”目标以及未来几年可能的低碳战略和技术升级方向，将机队性能优化和发展可持续燃料作为未来几年有效的降碳手段(袁志逸等，2022)．因此，本研究设置基准情景、飞机性能优化情景和替代燃料情景，并对3种情景下2023—2030年期间中国航空业产生的CO_2排放量进行预测．

2.3.1 基准情景(情景1) 基准情景是假设不对现有飞机进行任何优化和改进，延续现有的飞机性能和机队配置情况．除机队起降架次变化之外，机队配置情况、排放因子均与现状保持一致(许绩辉等，2022)．因此，利用起降架次预测结果和2021年机队配置情况计算的排放因子来预测2023—2030年期间中国航空业的碳排放量，作为其他情景的基准．

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　2022 年中国全行业运输飞机架数及占比

Table 2　The number and proportion of transport aircraft in China′s entire industry in 2022

机型	期末架数/架	发动机	比例	机型	期末架数/架	发动机	比例
B737-800	1190	CFM56-7B24	29.35%	B787-8	7	GEnx-1B	0.17%
A320	788	V2527-A5	19.44%	B777F	30	GE90-77B	0.74%
A321	334	CFM56-5B3/3	8.24%	A321NEO	109	CFM56-5B3/3	2.69%
A319	174	CFM56-5B7/P	4.29%	B747-400F	13	PW4056	0.32%
B737-700	143	CFM56-7B22	3.53%	A350-900	45	Trent XWB-84	1.11%
A330-300	129	Trent 700	3.18%	B737-300F	0	CFM56-3B	0.00%
A330-200	104	Trent 700	2.57%	EMB-145	8	AE3007A1	0.20%
EMB-190	85	AE3007A1	2.10%	B747-8	7	GEnx-2B	0.17%
B737MAX8	97	LEAP-1B	2.39%	A300-600F	6	CF6-80C2A8	0.15%
B777-300ER	63	GE90-115BL	1.55%	B737-900ER	6	CFM56-7BE	0.15%
B787-9	83	GEnx-1B	2.05%	A380	5	Trent 900-84	0.12%
B737F	74	CFM56-7B22	1.83%	B767-300F	13	CF6-80C2A1	0.32%
A320NEO	341	PW1100G-JM	8.41%	B737-900	5	CFM56-7B27	0.12%
B757-200F	58	RB211-535E4	1.43%	其他	137	-	3.38%

对近 10 年的全国民航运输机场起降架次进行整合统计,并计算每一年对比前一年的增长率,结果如图 1 所示.由于 2020—2022 年受疫情的影响,增长率波动很大,所以这 3 年在进行预测时未考虑进去.

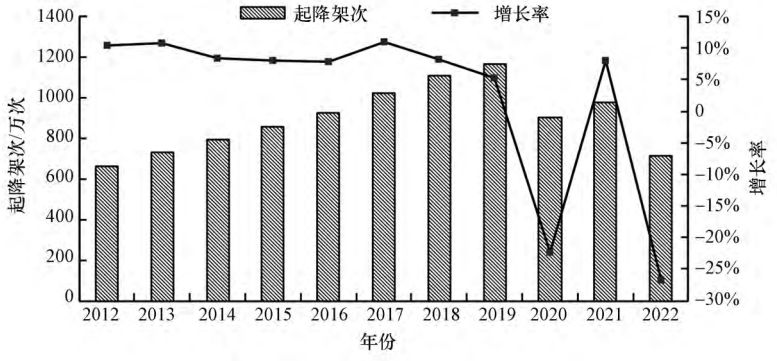


图 1　2012—2022 年民航运输机场起降架次

Fig.1　Number of takeoffs and landings at civil aviation transport airports in 2012—2022

基于 2012—2019 年飞机起降架次数据拟合的线性方程为 y=73.671x-147577, R^2=0.995,线性关系良好(图 2).根据拟合出的线性方程预测出的未来 10 年起降架次结果如表 3 所示.

2.3.2　飞机性能优化情景(情景 2)　采取合理分配旅客和货物、空重管理、机务维修及清洗发动机等措施,可以有效地降低飞机的质量,控制飞机的重心位置,同时可确保在飞行安全的前提下有效降低飞机的燃油消耗率.由于新型飞机在近 10 年很难投入使用,所以依靠改变现有飞机本身性能来降低油耗从而降低大气污染物及碳排放量是非常有效的,可使排放量减少 10%(廖忠权, 2018).

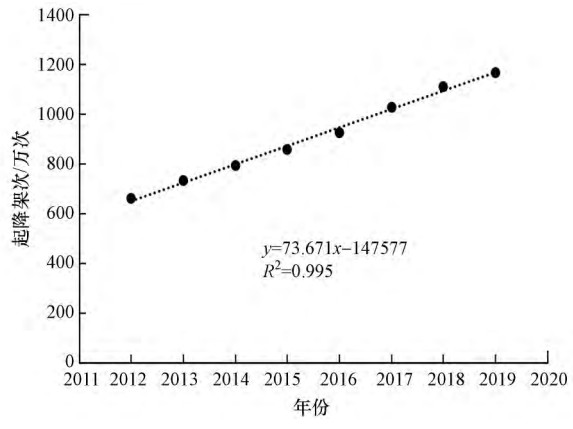


图 2　2012—2019 年起降架次线性回归预测量

Fig.2　Linear regression prediction of the aircraft takeoff and landing sorties in 2012—2019

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表3 2023—2030年起降架次线性回归预测量

Table 3 Results of linear regression prediction for the aircraft takeoff and landing sorties in 2023—2030

年份	2023年	2024年	2025年	2026年	2027年	2028年	2029年	2030年
起降架次/万次	1459.43	1533.1	1606.78	1680.45	1754.12	1827.79	1901.46	1975.13

2.3.3 替代燃料技术情景(情景3) 可持续飞机燃油作为一种传统航油的替代燃油,具有更高的环保效率,其原料为可持续有机原料或可再生能源、水和二氧化碳.与传统的飞机燃油相比,它所产生的全寿命的碳排放量只有20%~40%,并且不受技术、工艺的局限.随着技术的不断发展,将可再生能源汽油和航空煤油结合在一起的比重已超过50%(戢时雨等, 2022).到2032年,随着可持续燃料使用占比增加,可使碳排放量减少幅度达到60%~80%(崔玺康等, 2021).

3 结果与讨论(Results and discussion)

3.1 2021—2022年中国民航机场LTO循环排放清单

如表4所示,2021年中国民航机场LTO循环阶段中NO_x、CO、HC、SO_2、PM和CO_2排放量分别为10.46×10^4、8.26×10^4、0.69×10^4、0.31×10^4、0.08×10^4、1467.25×10^4 t;2022年中国民航机场LTO循环阶段中NO_x、CO、HC、SO_2、PM和CO_2排放量分别为7.80×10^4、6.17×10^4、0.51×10^4、0.23×10^4、0.06×10^4、1079.60×10^4 t.相比于2021年,2022年中国民航飞机LTO循环阶段大气污染物及碳排放总量降低了26.41%,其中,NO_x、CO、HC、SO_2、PM和CO_2排放量分别降低了25.43%、25.30%、26.09%、25.81%、25.00%、26.42%.相比于2021年,2022年民用航空机场起降架次降低了26.85%,从而使得2022年大气污染物及碳排放量减少.

表4 2021—2022年中国民航飞机LTO循环大气污染物及碳排放量

Table4 Air pollutants and CO_2 emissions of LTO cycle from China's civil aviation aircraft in 2021—2022

年份	排放量/(10^4 t·a^{-1})						
	NO_x	CO	HC	SO_2	PM	CO_2	总量
2021	10.46	8.26	0.69	0.31	0.08	1467.25	1487.07
2022	7.80	6.17	0.51	0.23	0.06	1079.60	1094.37

3.2 2021—2022年污染物排放量的时间变化

2021年大气污染物及碳排放量的变化趋势与新冠疫情形势紧密相关.随着1、2月疫苗的研发和接种(https://www.beijing.gov.cn/ywdt/zybwdt/202112/t20211213_2559281.html),3—6月,疫情进入相对平稳状态,航空运输量波动不大,与疫情前波动情况保持一致.但在6月新一轮疫情开始大规模爆发,8月大气污染物及碳排放量降至低值后缓慢回升,于11月再次降至低值后回升(焦艳梅等, 2022).可见,污染物月排放年占比变化与疫情变化趋势基本一致.2022年1—4月新增确诊病例逐月增高,受疫情影响航空运输量下降,从而导致污染物排放量下降.5—7月疫情得到控制,疫情整体呈持续波动下降态势,航空运输量持续增加导致污染物月排放量上升.8—11月新一轮疫情来袭,受疫情影响航空运输量呈下降态势,使得污染物月排放量呈降低趋势.

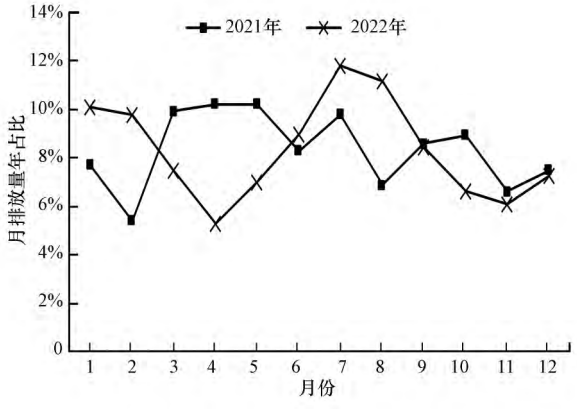


图3 2021—2022年机场大气污染物及碳月排放量的年占比

Fig.3 Monthly emissions as a percentage of annual emissions of air pollutants and CO_2 from airports in 2021—2022

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

如图4所示,2021年第1季度我国GDP同比增长18.7%,第2季度GDP同比增速下降但排放量在增加,主要原因是2020年第1季度疫情突发导致GDP大幅下降,使得2021年第1季度GDP同比增幅过大.后续第3季度的GDP同比增长变化趋势与排放量变化趋势基本保持一致.随着GDP同比增长的不断提升,机场排放量也呈现出相应的变化趋势,这表明机场排放量与经济发展水平之间存在着密切的联系.2022年第1季度GDP同比增长4.8%,但第2季度GDP同比增长为2022年最低(0.4%),后续两个季度GDP同比增长分别为3.9%和2.9%.4个季度GDP同比增长的变化趋势与排放量变化趋势基本保持一致,这也进一步表明机场大气污染物及碳排放量与经济发展水平之间存在着密切的联系.

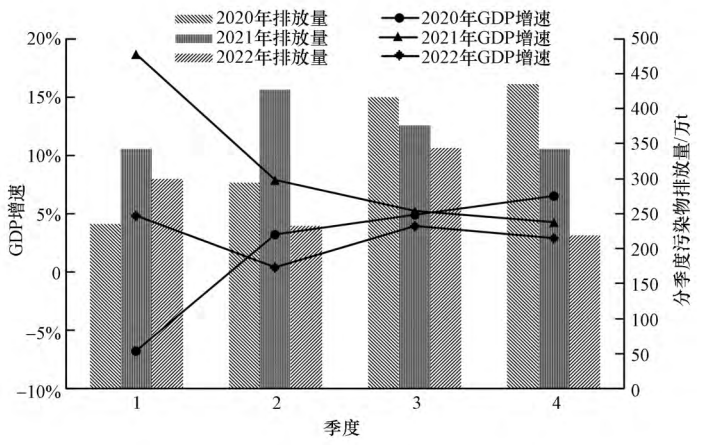


图4　2020—2022年分季度大气污染物及碳排放量与GDP增速对比

Fig.4　Comparison between quarterly emissions of air pollutants and CO_2 and GDP growth in 2020—2022

3.3　2021—2022年不同飞行模式下排放特征

2021—2022年CO、HC、SO_2、CO_2主要排放来自滑行阶段,2021年4种污染物滑行阶段的排放量分别占总排放量的92.57%、89.78%、41.06%、41.06%,2022年分别占总排放量的92.55%、89.76%、41.12%、41.12%(图5).由于飞机在LTO循环的滑行阶段和进近阶段处于低推力模式,推力分别只有标准推力的7%和30%,尤其当飞机处于滑行阶段时,燃烧室处于压力和较低温的状态(Sawyer *et al.*, 1973; Yelvington *et al.*, 2007),从而导致燃油无法完全燃烧.此外,HC和CO的排放因子较大(EPA, 1992; Kurniawan *et al.*, 2011),所以HC、CO在滑行阶段的排放占比最高(AAF, 2015;Li *et al.*, 2020).而SO_2、CO_2的排放量与燃油消耗量成正比,在LTO循环四阶段中滑行过程的时间最长(图6),且滑行过程中消耗的燃油量最多(ICAO,2006;Henry-Lheureux *et al.*,2021),所以这两种污染物在滑行阶段的排放占比最高.而NO_x、PM在爬升阶段的排放占比最高,这是由于飞机在爬升阶段的推动力较大,燃油的消耗率也更高,从而导致氧气供应不足,使得空燃比降低,

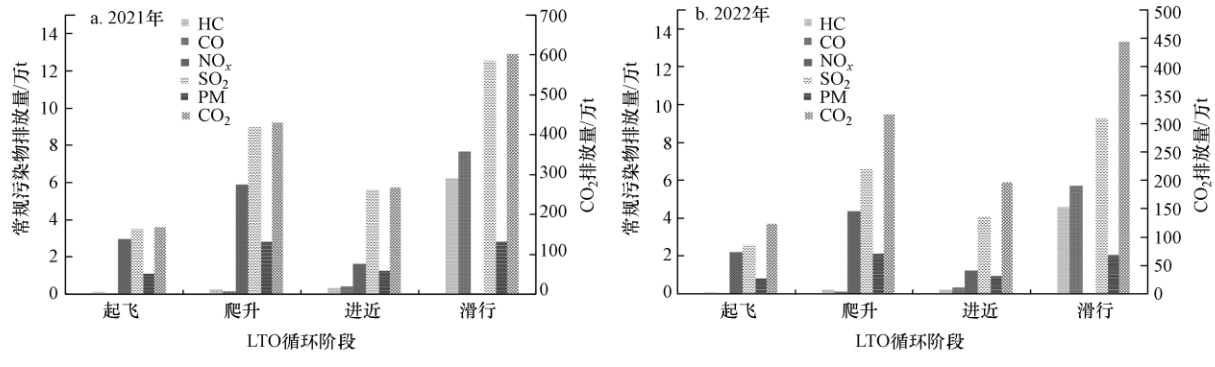


图5　2021—2022年中国民航机场飞机LTO循环阶段大气污染物及碳排放量(图中HC排放量乘10,SO_2、PM排放量乘100)

Fig.5　Air pollutants and CO_2 emissions of LTO cycle in China′s civil aviation airports in 2021—2022

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

进而使得燃烧室温度升高、压力增大，最终导致NO_x和PM的排放量也相应增多(Woody *et al.*, 2011; Akdeniz, 2022). 由此可知，提高燃油燃烧效率，选用燃烧效率高、燃油和排放率低的发动机(Moore *et al.*, 2017; Koudis *et al.*, 2017)，以及优化LTO循环模式是减少飞机大气污染物及碳排放的重要途径.

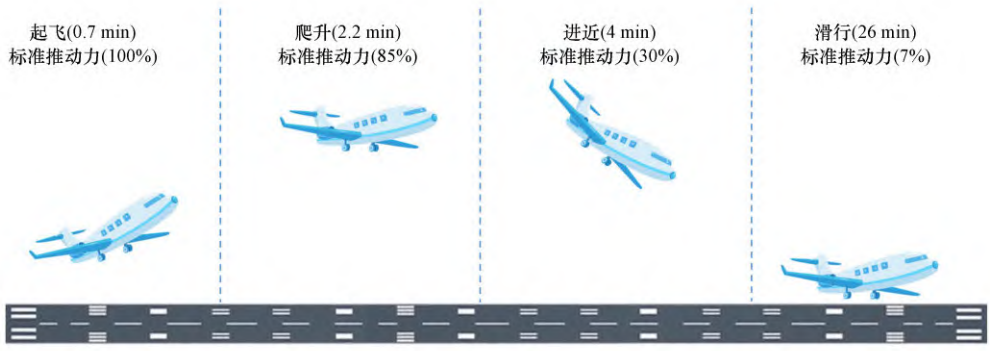


图6 LTO循环示意图

Fig.6 LTO cycle diagram

3.4 2021—2022年大气污染物及碳排放量的空间分布

2021年中国民航机场CO_2排放量存在着较大的地区差异(图7). 北京、上海、广州、重庆等经济发达、人口密集、人员流动需求大的机场CO_2排放量较高. 由于2021年新冠疫情进入相对平稳状态，人们的旅游需求较2020年出现提升，昆明和成都等旅游城市机场的CO_2排放量也处于较高水平. 受地理位置、气候条件和人口密度等因素的影响，东部及东部偏南地区大部分机场的CO_2排放量都处于较高水平，整个西部地区机场的CO_2排放量都处于较低水平. 2022年中国民航机场CO_2排放量仍存在着较大的地区差异. 相比于2021年，2022年中国民航飞机LTO循环碳排放量降低了26.42%，主要原因是2022年GDP较2021年增速有所降低，且2022年绝大部分时间仍处于疫情防控状态.

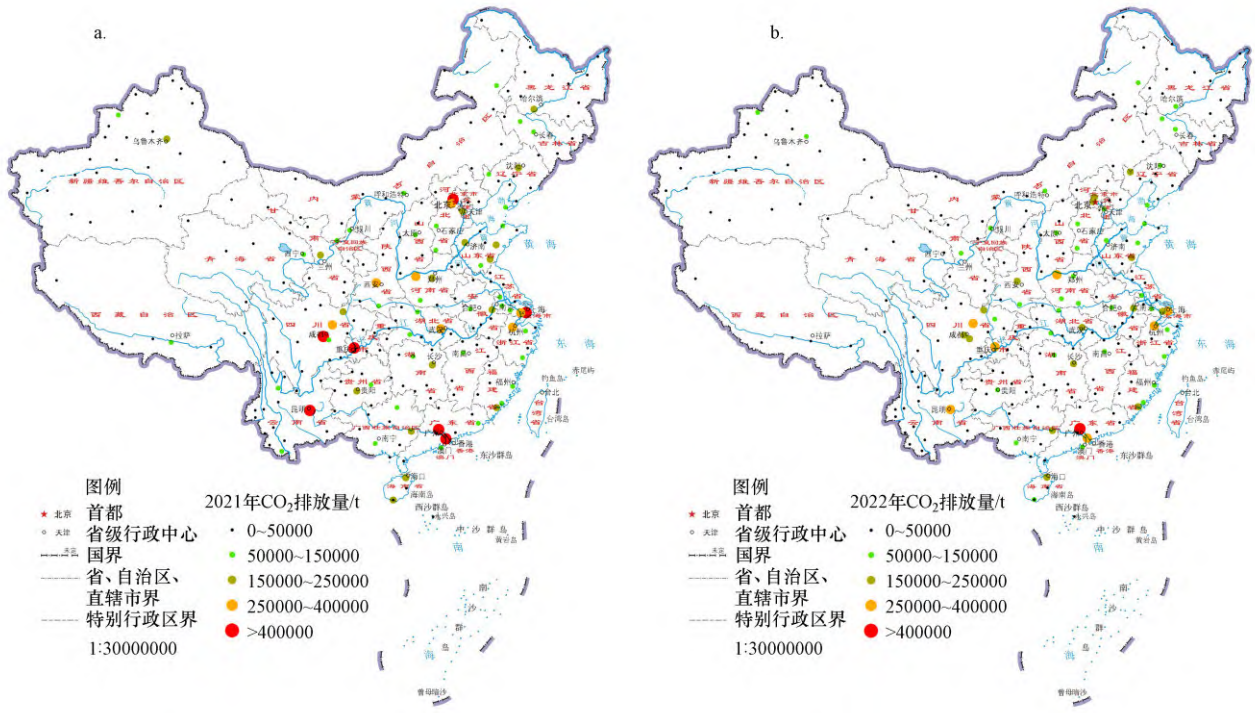


图7 2021—2022年中国民航机场CO_2排放分布变化

Fig.7 Changes in the distribution of CO_2 emission in China's civil aviation airports in 2021—2022

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

各省、自治区和直辖市CO_2排放量按六大区整合后的结果如图8所示.六大区中的省、自治区和直辖市分布见表5(葛瑶, 2020).2021年华东地区民航机场的CO_2排放量最高,在总排放量中占比25.94%,中南地区次之,占比25.85%;2022年中南地区民航机场的CO_2排放量最高,在总排放量中占比27.03%,华东地区次之,占比25.27%.华东地区的GDP总量居全国之首,其经济社会发达程度令世界瞩目,上海市、江苏省、浙江省等地的GDP快速增长,其中,上海浦东机场、上海虹桥机场等机场航线众多,航班派送频繁,使得当地机场的CO_2排放量大幅度增加.中南地区常住人口和GDP总量在六大区中排名第2,包含河南、湖北等人口大省和广东等经济发达大省,航班需求量和起降量较高,因此,2021及2022年华东地区和中南地区民航机场CO_2排放量处于较高水平.2021年西北和东北地区民航机场CO_2排放量占比最低,分别仅占11.07%和6.40%;2022年西北和东北地区民航机场CO_2排放量占比最低,分别占9.78%和7.26%.这两个地区的经济发展水平和居民数量都处于较低水平,70%的机场都是4C级的支线机场,因此,航空需求量较低,污染程度也随之减轻.由此可知,不同地区的民航机场CO_2排放量与经济水平和人口数量等因素紧密相关.

表5　中国六大区城市分布

Table5　Distribution of six regional cities in China

区域	省(自治区、直辖市)
东北	吉林省、辽宁省、黑龙江省
华北	北京市、天津市、河北省、山西省、内蒙古自治区
华东	上海市、江苏省、浙江省、安徽省、福建省、江西省、山东省、
中南	河南省、湖北省、广西壮族自治区、广东省、湖南省、海南省
西南	四川省、贵州省、云南省、重庆市、西藏自治区
西北	陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区

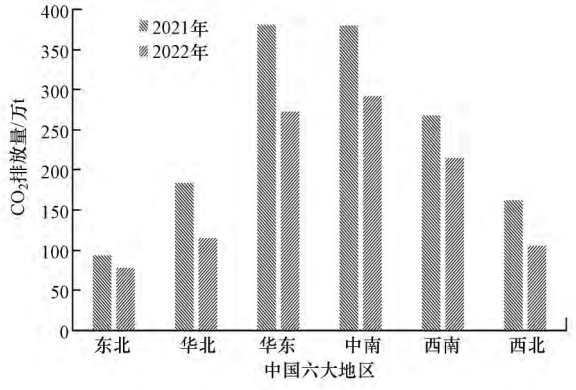


图8　2021及2022年中国六大地区民航机场CO_2排放量分布

Fig.8　Changes in the distribution of CO_2 emission from civil aviation airports in six major regions of China in 2021 and 2022

3.5　未来情景预测分析

基于表3的结果,预测不同情景下2023—2030年中国航空业CO_2的排放趋势,结果如图9所示.在情景1中,随着航空需求快速增长,中国民航业碳排放量快速上升,呈现"准线性"排放的特征,2030年CO_2排放量将达到3368万t,是2023年的1.35倍,到2030年将累计将带来23426万t的碳排放.

在情景2中,由于都沿用常规机型和常规操作,碳减排占比没有太大变化,保持在每年10%左右.2030年CO_2排放量将达到3031.20万t,到2030年累计CO_2排放量将达21083.40万t,与基准情景相比,CO_2排放将减少2342.60万t.

在情景3中,由于每年可持续燃料占比增加,预计到2030年可持续燃料投入量将增加到现在的10倍,

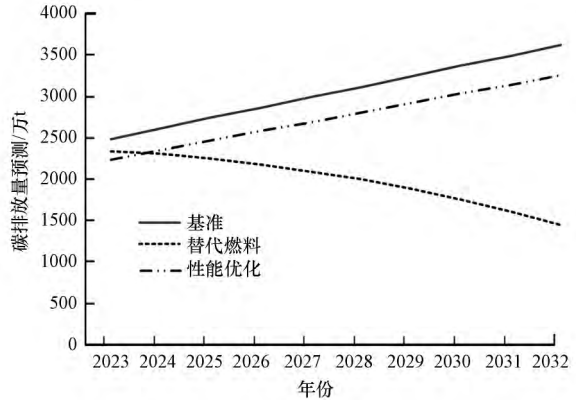


图9　2023—2030年中国民航业CO_2排放量预测

Fig.9　The CO_2 emissions prediction in China's civil aviation airports in 2023—2030

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

所以CO_2减排量与可持续燃料投入量占比变化保持基本一致，平均每年CO_2减排量增加6%. CO_2排放量在2030年将达到最小值1751.36万t，到2030年累计CO_2排放量为16784.48万t，与基准情景相比，CO_2排放量将减少6641.52万t.

综上所述，情景3（替代燃料情景）的减排效果最好，到2030年累计减少碳排放量6641.52万t，减排效率达到28.35%.因此，从短期技术可行性来看，航空业应加大可持续燃料的产量，将更多可持续燃料投入到使用中，并且对可持续燃料种类和效率进行深度研发，继续寻找更易生产、效率更高的可持续燃料.

3.6 不确定性分析

本研究使用蒙特卡罗方法定量评估排放清单的不确定性（Shan *et al.*, 2023），根据活动水平和排放因子的概率分布产生随机数，计算对应的排放量.重复上述计算过程10000次，求解得到2021—2022年中国民航飞机LTO循环大气污染物及碳排放量的不确定性范围（表6）.结果表明，2021—2022年中国民航机场排放清单结果相对稳定.

除了上述不确定性外，本研究建立的清单还存在一些局限性：第一，本研究利用ICAO推荐的发动机排放系数估算民用航空污染排放，其运行参数受飞机发动机类型、实际运行情况及周围环境的影响，可能与民航飞机实际运行情况存在差异；第二，本研究采用不同机型的发动机加权法确定航空燃油消耗量，机队配置比并不完全等于飞机的实际起降比，会与实际情况有所偏差.

表6 污染物排放量不确定性范围

Table6 Uncertainty ranges in the estimated pollutant emissions

年份	不确定性范围					
	HC	NO_x	CO	PM	SO_2	CO_2
2021	−4.6%~4.7%	−5.8%~6.0%	−4.6%~4.7%	−4.6%~4.6%	−4.6%~4.7%	−4.7%~4.7%
2022	−4.4%~4.5%	−5.5%~5.7%	−4.4%~4.5%	−4.5%~4.5%	−4.5%~4.5%	−4.5%~4.5%

4 结论（Conclusions）

1）2022年中国民航机场LTO循环NO_x、CO、HC、SO_2、PM和CO_2排放量分别为7.80×10^4、6.17×10^4、0.51×10^4、0.23×10^4、0.06×10^4、1079.60×10^4 t.与2021年相比，2022年中国民航飞机LTO循环大气污染物及碳排放总量降低了26.41%.机场排放量在一定程度上与经济发展水平有关联且受疫情形势的影响.此外，不同飞行模式下的污染物排放差异较大.

2）2021及2022年中国民航机场CO_2排放量存在较大的地区差异.受地理位置、经济发展水平和人口密度等因素的影响，东部及东部偏南地区大部分机场的CO_2排放量都处于较高水平，整个西部地区的机场排放量较低.

3）对民用航空机场开展了“碳达峰”情景下不同低碳路径分析，并设置了基准情景、飞机性能优化情景和替代燃料情景，发现替代燃料情景下的减排效率最高，该情景下，到2030年累计碳排放量为16784.48万t，减排效率达到28.35%.因此，“碳达峰”情景下民用航空机场减污降碳的最佳路径为选用替代燃料技术.

责任作者简介：伯鑫，男，博士，教授，博士生导师，研究领域为环境质量模拟、排放清单，主持和参加科研项目等50余项，发表学术论文100多篇.

参考文献（References）：

Akdeniz H Y.2022.Estimation of aircraft turbofan engine exhaust emissions with environmental and economic aspects at a small-scale airport[J].Aircraft Engineering and Aerospace Technology,94(2):176-186

Aviation Administration Federal (AAF). 2015. Aviation emissions, impacts & mitigation: a primer[EB/OL]. 2015-01. https://www. faa. gov/regulations_policies/policy_guidance/envir_policy/media/Primer_Jan2015.pdf

北京日报.2021.全国新冠病毒疫苗接种超26亿剂次[EB/OL].2021-12-13.https://www.beijing.gov.cn/ywdt/zybwdt/202112/t20211213_2559281.html

Bo X, Xue X, Xu J, *et al*.2019.Aviation's emissions and contribution to the air quality in China[J].Atmospheric Environment,201:121-131

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

CAAC.2020.Statistical bulletin for development of China's civil aviation industry in 2019[OL].2023-03-28. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/202006/P020200605630677965649.pdf

Civil Aviation Administration of China (CAAC).2021.Civil Aviation from the Perspective of Statistics[M].Beijing: China Civil Aviation Publishing House

Civil Aviation Administration of China (CAAC).2022.Civil Aviation from the Perspective of Statistics[M].Beijing: China Civil Aviation Publishing House

崔玺康，邢子恒，胡晓佳.2021."双碳"目标下的可持续航空燃料[J].大飞机,(8):77-79

Galant-Gołębiewska M，Jasiński R，Ginter M，*et al*.2021.Methodical aspects of the LTO cycle use for environmental impact assessment of air operations based on the Warsaw Chopin airport[J].Aviation,25(2):86-91

葛瑶.2020.我国行政区划发展变迁中的问题考察[D].兰州:甘肃政法大学

韩博，何真，张铎，等.2020a.粤港澳大湾区飞机LTO污染排放因子及排放清[J].中国环境科学,40(12):5182-5190

韩博，孔魏凯，姚婷玮，等.2020b.京津冀机场群飞机LTO大气污染物排放清单[J].环境科学,41(3):1143-1150

Henry-Lheureux T，Seers P，Ghedhaïfi W，*et al*.2021.Overview of emissions at Montreal's Pierre Elliott Trudeau International Airport and impact of local weather on related pollutant concentrations[J].Water，Air，and Soil Pollution,232(5),DOI：10.1007/s11270-021-05087-2

IEA.2022.Aviation Subsector：Not on track[OL].2023-03-20. https://www.iea.org/reports/aviation

International Civil Aviation Organization (ICAO).2006.Airport air quality manual (revision based on the first edition)[S].Montréal: International Civil Aviation Organization,Doc 9889

International Civil Aviation Organization (ICAO).2023.ICAO aircraft engine emissions databank[EB/OL].2023-02.https://www.easa.europa.eu/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank

戢时雨，刘建国，朱跃中.2022."双碳"目标下中国民航用能低碳发展路径探讨[J].国际石油经济,30(4):31-39

焦艳梅，张云辉，赵雅琳，等.2022.2021年全球传染病重要疫情事件回顾[J].传染病信息,35(1):27-38

Koudis G S，Hu S J，Majumdar A，*et al*.2017.Airport emissions reductions from reduced thrust takeoff operations[J].Transportation Research Part D：Transport and Environment,52:15-28

Kurniawan J S，Khardi S.2011.Comparison of methodologies estimating emissions of aircraft pollutants，environmental impact assessment around airports [J].Environmental Impact Assessment Review,31(3):240-252

Li J，Yang H，Liu X，*et al*.2020.Aircraft emission inventory and characteristics of the airport cluster in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area，China[J].Atmosphere,11(4):323

李也.2021.通用飞机混合电推进系统方案设计及性能分析[D].北京:清华大学

廖忠权.2018.航空混合电推进系统发展研究[J].航空动力,(2):45-50

Moore R H，Thornhill K L，Weinzierl B，*et al*.2017.Biofuel blending reduces particle emissions from aircraft engines at cruise conditions[J].Nature,543 (7645):411-415

Roessler C，Schoemann J，Baier H.2010.Aerospace application of hydrogen and fuel cells[C].18th World Hydrogen Conference. Essen

Sawyer R F，Cernansky N P，Oppenheim A K.1973.Factors controlling pollutant emissions from gas turbine engines[C].AGARD Conference Proceedings No.125"Atmospheric Pollution by Aircraft Engines".London:1-13

Shan W，Chen S，Wang G，*et al*.2023.Clearing the air：Assessing the effectiveness of emission policy in Qinhuangdao's key industries[J].Atmosphere, 14(8):1218

宋利生.2013.基于ICAO起降模型的中国机场飞机排污计算研究[J].中国民航大学学报,31(6):46-48+54

U.S.Environmental Protection Agency (EPA).1992.Procedures for emissions inventory preparation，vol.IV：mobile sources[R].EPA420-R-92-009. Washington DC: U.S.Environmental Protection Agency.1-240

王瑞鹏，周颖，程水源，等.2020.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,40(4):1468-1476

Woody M，Baek B H，Adelman Z，*et al*.2011.An assessment of aviation′s contribution to current and future fine particulate matter in the United States[J]. Atmospheric Environment,45(20):3424-3433

许绩辉，王克.2022.中国民航业中长期碳排放预测与技术减排潜力分析[J].中国环境科学,42(7):3412-3424

闫泽辉.2020.叶尖喷气自驱动风扇的超高涵道比发动机总体性能研究[D].南京:南京航空航天大学

杨凤田，范振伟，项松，等.2021.中国电动飞机技术创新与实践[J].航空学报,42(3):7-12

Yelvington P E，Herndon S C，Wormhoudt J C，*et al*.2007.Chemical speciation of hydrocarbon emissions from a commercial aircraft engine[J].Journal of Propulsion and Power,23(5):912-918

尤倩，李洪枚，伯鑫，等.2022.中国民用航空机场大气污染物及碳排放清单[J].中国环境科学,42(10):4517-4524

袁志逸，彭天铎，任磊，等.2022.基于机队视角的中国民航运输低碳发展情景分析[J].动力工程学报,42(11):1068-1076

张利国，张健.2018.太阳能飞机关键技术及发展情况分析[J].机械工程师,42(3):4-7

张玉玺.2013.生物航空煤油的发展现状[J].当代化工,42(9):1316-1318

朱佳琳，胡荣，张军峰，等.2020.中国航空器碳排放测算与演化特征研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),44(3):558-563

中国民用航空局.2021."十四五"民航绿色发展专项规划[EB/OL].2021-12-27. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/FZGH/202201/t20220127_211345.html

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net