



WMO

政府间气候变化专业委员会



UNEP



IPCC 特别报告

航空和全球大气

决策者摘要





WMO



UNEP

决策者摘要

航空和全球大气

编辑

Joyce E. Penner

密执根大学

David H. Lister

国防研究和评估署

David J. Griggs

英国气象办公室

David J. Dokken

大气研究大学公司

Mack McFarland

杜邦氟制品

政府间气候变化专业委员会（IPCC）第I和III工作组的专题报告

与《破坏臭氧层物质蒙特利尔议定书》

科学评估小组合作完成

为政府间气候变化专业委员会发行

© 1999,政府间气候变化专业委员会

ISBN: 92-9169-611-0

“国际民航组织为政府间气候变化专业委员会翻译”

内 容

序言.....	V
前言.....	Vii
1. 引言.....	3
2. 航空器如何影响气候和臭氧?	3
3. 如何预测未来航空排放物的增长?	4
4. 亚音速航空现在和将来对辐射加压和紫外线辐射的影响?	6
4.1 二氧化碳.....	6
4.2 臭氧.....	6
4.3 甲烷.....	7
4.4 水蒸气.....	7
4.5 凝结尾流.....	7
4.6 卷云.....	8
4.7 硫酸盐和烟尘烟雾.....	8
4.8 亚音速航空器的整体气候影响?	8
4.9 亚音速航空器对紫外线辐射的整体影响?	9
5. 超音速航空现在和将来对辐射加压和紫外线辐射的影响?	9
6. 减少排放和其影响的其他方案?	10
6.1 航空器和发动机技术方案.....	10
6.2 燃油方案.....	11
6.3 运营方案.....	11
6.4 规章、经济和其他方案.....	11
7. 未来的议题.....	12
IPCC产品清单	13



序言

世界气象组织(WMO)和联合国环境署(UNEP)于1988年共同成立了政府间气候变化专家组(IPCC),以便:(I)对气候变化的科学、影响、经济、减轻其影响的方案和/或与其相适应的现有资料进行评估(II);应要求向《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)的成员国会会议(COP)提供科学、技术、社会和经济的建议。IPCC自成立以后已产生了一系列评估报告、专题报告、技术报告、方法论和其他的作品,他们已成为标准的参考工具,被政策制定者、科学家和其他专家广泛使用。

这份专题报告是应国际民用航空组织(ICAO)和《破坏臭氧层物质蒙特利尔议定书》成员国的要求而准备的。对亚音速和超音速机队关于大气、航空技术、社会经济事宜及与此有关的缓解方案的相关科学理解状况做了评估和报告。报告涵盖了航空过去和未来对同温层臭氧的破坏和全球气候变化的潜在影响;但没有论及航空对局部范围的环境影响。报告综合了判明和论述减轻未来影响的一些调查结果。

如同IPCC一样,产生这个报告的成功首先和主要依赖于世界范围内许多相互有关但不同学科专家的积极性与合作。

G.O.P.Obasi

世界气象组织
秘书长

我们向所有的协调先导作者、主要作者、撰稿作者、审稿编辑和专家审稿人表示感谢。这些人员倾注了大量的时间和精力准备了这份报告,我们非常感激他们对IPCC进程的支持。

我们还衷心感谢:

- Robert Watson, IPCC主席和蒙特利尔议定书科学评估小组的联合主持人。
- John Houghton, Ding Yihui, Bert Metz, 和 Ogunlade Davidson, IPCC第I和III工作组的联合主持人。
- Daniel Albritton, 蒙特利尔议定书科学评估小组的联合主持人。
- David Lister和Joyce Penner, 此份专题报告的协调员。
- Daniel Albritton, John Crayston, Ogunlade Davidson, David Griggs, Neil Harris, John Houghton, Mack McFarland, Bert Metz, Nelson Sabogal, N. Sundararaman, Robert Watson, 和 Howard Wesoky, 此份专题报告的科学指导委员会成员。
- David Griggs, David Dokken, 以及第I和II工作组技术支援室的全体职员, 包括 Mack McFarland, Richard Moss, Anne Murrill, Sandy MacCracken, Maria Noguera, Laura Van Wie McGrory, Neil Leary, Paul van der Linden, 和 Flo Ormond, 以及Neil Harris, 他提供了额外的帮助。
- N. Sundararaman, IPCC秘书和他的职员, Rudie Bourgeois, Cecilia Tanikie, 和 Chantal Etori.

K. Töpfer

联合国环境署执行理事和
联合国内罗毕办事处秘书



前言

根据国际民用航空组织（ICAO）对航空器发动机温室气体排放物产生的后果进行评估的要求，IPCC在其第十二次会议上（墨西哥城，1996年9月11—13日）决定与蒙特利尔议定书科学评估小组合作起草这份报告。这项任务最初是IPCC第I和第II工作组的共同职责，但是在其职能权限改变之后（IPCC第十三次会议，马耳代夫，1997年9月22，25—28），这项职责被移交给IPCC第I和III工作组，I和II工作组的技术支援室继续提供行政支援。

尽管有动力的首次飞行还不到100年，但航空业已经历了快速增长并已成为现代社会的一个重要组成部分。即便没有政策的干预，这种增长也可能继续下去，因此急需对航空器发动机排放物目前和未来对大气的影响加以考虑。这份报告的一个独特之处在于航空业技术专家集体的参与，他们包括航空公司、飞机机身和发动机制造商，以及大气科学家。这种参与对于制定一份我们认为是迄今为止有关航空对全球大气影响最全面的评估是极为关键的。尽管这是IPCC在审议这个专门的工业分部门的第一份报告，但同样也要对其他行业进行研究。

这份报告审议了航空器排放到大气层顶部的气体 and 颗粒，以及它们在改变大气化学特性和促使形成凝结尾流（凝结尾流）和卷云所起的作用。报告进而考虑了(a)大气的辐射特性如何发生改变，其结果可能导致气候变化；(b)臭氧层如何产生变动，以致引起射到地球表面紫外线的发生变化。报告还审议了航空器技术、航空运输飞行、体制、规章和经济框架潜在的变化对未来排污的影响。这份报告没有论及发动机的排放物对接近地表的当地空气质量的影响。

这份专题报告的目标是提供一个准确的，无偏见的，与政策相关的资料，以满足航空业和专家以及决策层的需要。报告在叙述对目前情况了解的同时，还指出我们对某些领域的了解尚很缺乏，需要进一步紧迫的工作。报告没有对政策做出建议或建议政策倾向性，因此符合IPCC的做法。

这份报告由18个国家的107位主要作者汇集而

成。下面的报告草案将分发给专家进行审核，然后由政府 and 专家们审议。100多位撰稿作者向主要作者提交了草案文本和资料，150名审稿人在审核过程中提供了有价值的建议加以改进。对收到的所有意见都进行了仔细的分析，并被纳入一份修订过的文件供IPCC第I和III工作组于1999年4月12—14日在哥斯达黎加圣何塞召开的联席会议审议。在这次会议上详细地通过了致决策者的结论，并接受了附后的报告。

我们向报告的协调员 David Lister 和 Joyce Penner，向所有的协调领导作者，主要作者和审稿编辑表示衷心的感谢，他们的专业学识、勤奋和耐心是成功地完成这份报告的基石，同时还感谢众多撰稿人和评论作家的有价值 and 悉心的奉献和工作。我们感谢领导委员会在报告准备过程当中的智慧协商和指导。我们还感谢：

- ICAO主持召开首次报告的会议 and 最终起草报告的会议，同时将致决策者的结论翻译成中文，阿拉伯文、法文、俄文 and 西班牙文。（ICAO还视要求提供了技术方面信息）。
- 特立尼达和多巴哥政府主持召开了第一次报告起草会议。
- 国际航空运输协会（IATA）主持召开了第二次报告起草会议。
- 哥斯达黎加政府主持召开了IPCC第I和III工作组的联席会议（1999年4月12—14日），在这次会议上逐行通过了致决策者的结论 and 接受了其后的评估。

我们还特别感谢 John Crayston (ICAO)，Steve Pollonais (特立尼达和多巴哥政府)，Leonie Dobbie (IATA) and Max Campos (哥斯达黎加政府)，他们为安排这些会议承受了很大的负担。

我们还感谢第I工作组技术支援室的 Anne Murrill 和第II工作组技术支援室的 Sandy MacCracken，感谢他们在报告准备的整个过程当中不知疲倦 and 富于情趣的支持。第I and II工作组技术支援室的其他人员也都提供了很多协助，包括

Richard Moss, Mack McFarland, Maria Noguera, Laura Van, Wie McGrory, Neil Leary, Paul van der Linden, 和Flo Ormond。IPCC秘书处的职员Rudie Bourgeois, Cecilia Tanikie, 和Chantal Etori在和政

Robert Watson, IPCC主席

John Houghton, IPCC第I工作组联合主持人

Ding Yihui, IPCC第I工作组联合主持人

Bert Metz, IPCC第III工作组联合主持人

府的联络以及专家在往返发展中和经济过渡国家旅行中提供了后勤支援。

Ogunlade Davidson, IPCC第III工作组联合主持人

N. Sundararaman, IPCC秘书处

David Griggs, IPCC第I工作组技术支援室

David Dokken, IPCC第II工作组技术支援室

决策者摘要

航空和全球大气

政府间气候变化专家组第I和III工作组的专题报告

这份报告的细节已在IPCC第I和III工作组联席会议上得以通过（1999年4月12-14日，哥斯达黎加圣何塞），它体现了IPCC目前对航空和全球大气理解的一个正式的认同的声明。

本报告根据下列人员起草的草案编写：

David H. Lister, Joyce E. Penner, David J. Griggs, John T. Houghton, Daniel L. Albritton, John Begin, Gerard Bekebrede, John Crayston, Ogunlade Davidson, Richard G. Derwent, David J. Dokken, Julie Ellis, David W. Fahey, John E. Frederick, Randall Friedl, Neil Harris, Stephen C. Henderson, John F. Hennigan, Ivar Isaksen, Charles H. Jackman, Jerry Lewis, Mack McFarland, Bert Metz, John Montgomery, Richard W. Niedzwiecki, Michael Prather, Keith R. Ryan, Nelson Sabogal, Robert Sausen, Ulrich Schumann, Hugh J. Somerville, N. Sundararaman, Ding Yihui, Upali K. Wickrama, Howaard L. Wesoky

1. 引言

这份报告评估了航空器对气候和大气臭氧的影响，是IPCC对这个特殊工业分部门的第一份报告。由于航空排放物的潜在影响，应国际民航组织(ICAO)¹的要求，IPCC与《破坏臭氧层物质蒙特利尔议定书》的科学评估组合作起草了这份报告。航空排放物是直接排放到对流层顶部和同温层底部占主导地位的人为排放物。

由于世界经济的增长，航空也经历了快速的发展。旅客运输量(以收费旅客公里表示²)自1960年以来每年增长近9%，是国民生产总值(GDP)平均增长率的2.4倍。大约80%是由客机承运的货物运输同期也有增长。由于运输业日趋成熟，旅客运输量的增长在1997年放慢至5%。对航空运输需求的增长正在超过对技术和运营程序不断改进使某些具体排污量³降低的速度，因此增加了整体航空排放。如果对需求不加限制，预计旅客运输会比这份报告所评估的期间以超过GDP的速度增长。

这份报告审议了航空目前的影响以及一系列对航空不加限制增长的预测(包括旅客、货物和军事)，还有第二代商用超音速航空器机队可能带来的影响。报告还介绍了航空器现有的技术和运营程序，以及减轻航空今后对全球大气影响的选择方案。报告没有审议航空器发动机排污物对局部环境的影响，或其他航空运营，如在机场地面运输使用的能源产生的非直接环境影响。

2. 航空器如何影响气候和臭氧？

航空器直接向对流层顶部和同温层底部排放气体和颗粒，它们会影响那里的大气层的结构。这些气体和颗粒改变了大气层温室气体，包括二氧化碳(CO₂)、臭氧(O₃)和甲烷(CH₄)的浓度，引发形成凝结尾流(凝固的尾迹)，并会增加卷云云量。所有这些都促成气候变化(见框1)。

航空器的主要排污物包括温室气体二氧化碳

和水蒸气(H₂O)。其他主要的排污物是一氧化氮(NO)和二氧化氮(NO₂)(合并称为NO_x)，氧化硫(SO_x)和油烟。航空燃油燃烧的总量以及航空器二氧化碳，NO_x和水蒸气排放物的总量与这个评估其他重要参数相比较是很好理解的。

航空排放的气体和形成的颗粒对气候的影响与排放物比较难以量化；但可以用辐射加压⁴的概念对它们进行相互比较，以及与其他部门对气候的影响进行比较。由于二氧化碳(CO₂)在大气层滞留很长时间(约100年)，因此它得以很好地融合在大气层中，航空器排放的二氧化碳的影响和其他来源排放同等数量二氧化碳所产生的影响没有什么区别。其他的气体(如NO_x、SO_x、水蒸气)和颗粒在大气层滞留时间较短，主要集中在靠近北部中纬度的飞行航路。这些排放物导致辐射加压使一些排放物，如臭氧和凝结尾流在局部地区靠近飞行航路，与此对比，有些排放物，如二氧化碳和甲烷是在全球范围融合。

全球平均的气候变化由全球均衡的辐射加压合理的表示出来，比如，在评估航空对全球平均温度和海平面的上升所起的作用。但由于航空对辐射加压发生的作用仅集中在北部中纬度地区，局部的气候反应会与全球平均辐射加压产生的反应有所不同。航空器对局部气候可能会有重要影响，但本报告对此未进行评估。

臭氧是一种暖室气体，它同时保护地球表面避免受到有害的紫外线辐射，是一种空气污染物。航空器排放的NO_x参与臭氧的化学反应。亚音速航空器在对流层顶部和同温层底部飞行(高度约为9—13公里)，超音速航空器在同温层飞行，巡航高度要高几公里(约17—20公里)，对流层顶部和同温层底部的臭氧预计会由于NO_x的增加而上升，而甲烷预计会减少。在高空，NO_x的增加会导致同温层臭氧层的减少。臭氧的前身(NO_x)在这些地区的滞留时间随着高度而延长，因此航空器对臭氧产生的变动取决于NO_x释放的高度并由于同温层局部范围和对流层全球范围不同而各异。

¹ ICAO是联合国的专门机构，它负有为国际民用航空的各个领域，包括环境保护、制定标准和建议措施的全局义务

² 收费旅客公里是衡量商业航空承运的运输量：每一公里承运的每一位付费旅客。

³ 具体的排污指每一承运的运输单位的排污量，例如，每一收费旅客公里。

⁴ 辐射加压是测量气候发生重要潜在变化机制的一种方法。它以每平方米瓦特(Wm⁻²)表示地球大气层体系能量平衡的动荡和变化。辐射加压正值表示净变暖，负值表示变冷。

框1. 气候变化的科学

1995年出版的IPCC第I工作组为决策者提供的结论的第二份评估报告的一些主要结论，关于所有人为排放对气候变化的影响叙述如下：

- 自工业化前时期（约自1750年）以来温室气体含量的上升导致了气候的正面辐射加压，趋势是使地球表面变暖，并对气候产生其他的变化。
- 除其他物质以外，温室气体二氧化碳，甲烷和一氧化二氮（N₂O）在大气层里含量显著上升：分别约为30，145和15%（1992年数值）。这些趋势大部分归结于人类的活动，主要是燃煤的使用、土地使用的变化和农业。
- 许多温室气体在大气中可存活很长时间（二氧化碳和一氧化二氮可存活几十年至几百年）。因此，如果二氧化碳的排放量保持接近目前（1994年）的水平，它们可导致大气浓度在至少二个世纪中恒定的增长率，在21世纪末达到约500ppmv（约二倍于工业化前280ppmv的浓度）。
- 燃煤的燃烧，生物量燃烧和其他的来源产生的对流层烟雾引起了负面的辐射加压，当它集中于某一特定地区和次大陆地区时，可对气候模式产生洲际至半球效应。不同于寿命很长的温室气体，人为造成的烟雾在大气中寿命很短，因此它们的辐射加压根据排污量的增加或降低迅速变化。
- 我们从观测到的气候记录来量化人类对全球气候影响程度的能力迄今依然有限，因为期待的信号仍然从自然变化的噪声中涌现出来，同时在关键的因素中还有不确定的情况。这些包括长期自然变动的严重性和模式，以及温室气体和烟雾浓度的变化和陆地表面变动对时间演化的模式的加压和反因。尽管如此，平衡的证据表示人类确实对全球气候产生了影响。
- IPCC根据对1990—2100年期间人口和经济的增长、土地使用、技术变化、能源可用性和燃料混合的假设制定了一系列未来温室气体和烟雾预期排放方案，IS92a。通过对全球碳周期和大气化学反应的了解，这些排放可以用来预测温室气体和烟雾的大气浓度和自然辐射加压的变动。气候的模型可用来制定对未来气候的预测。
- 根据IS92方案预计，2100年全球表面平均气温要比1990年上升1至3.5摄氏度。在任何情况下变暖的平均速度要大于过去10,000年中的任何时间。局部气温的变化会与全球平均水平有很大的差别，每年至十几年实际的变化会包括大量自然的变幻。预计总体的变暖会导致酷热天数的增加和严寒天数的减少。
- 平均海平面会由于海洋温度的上升以及冰川和冰层的融化而增高。IS92方案预测2100年海平面要比1990年上升15至95厘米。
- 温度变暖会引起活跃的水文周期，这意味着在某些地方会发生严重的干旱和/或洪涝，而在其他地区发生不很严重的干旱和/或洪涝。一系列模型表明降雨量强度的增加，预兆会出现更多特大降雨过程的可能性。

水蒸气SO_x（形成硫酸颗粒）和油烟⁵在气候变化和臭氧化学反应中也起着直接和非直接的作用。

3. 如何预测未来航空排放物的增长？

全球旅客的航空旅行如果按收费旅客公里衡量，预计1990至2015年之间每年增长5%，而全部航空

燃油的使用，包括客运、货运和军事⁶运输预计同期每年增长3%，差异主要归结于航空器效益的改善。超过这一时间的预测尚不十分明朗，因此这份报告中审议了一系列未来不受约束的排放方案（见表1和图1）。全部这些方案均事先预料到未来仍将继续改进技术以降低每一付费旅客公里的

⁵ 空中的硫酸颗粒和油烟颗粒都是烟雾的范例。烟雾是悬浮在空中的细微的颗粒。

⁶ 历史分析表明民用和军用航空消耗的航空燃油1976年分别为64和36%，1992年分别为82和18%。预计到2015年会变化为：93和7%，2050年分别为97和3%。

表1: 本报告使用的未来全球航空器方案的结论

方案名称	每年运输平均增长 (1990-2050)	燃油消耗每年平均增长率 (1990-2050)	经济每年平均增长率	人口每年平均增长率	运输比率 (2050/1990)	燃油消耗比率 (2050/1990)	注
Fal	3.1%	1.7%	2.9% 1990-2025 2.3% 1990-2100	1.4% 1990-2025 0.7% 1990-2100	6.4	2.7	ICAO预测和经济支援小组 (FESG) 制定的参考方案; IPCC中期经济增长 (1992); 改进燃油效益和降低NO _x 的技术
Fal H	3.1%	2.0%	2.9% 1990-2025 2.3% 1990-2100	1.4% 1990-2025 0.7% 1990-2100	6.4	3.3	Fal运输和技术方案, 超音速航空器机队替代部分亚音速机队
Fa2	3.1%	1.7%	2.9% 1990-2025 2.3% 1990-2100	1.4% 1990-2025 0.7% 1990-2100	6.4	2.7	Fal运输方案; 更加重视降低NO _x 的技术, 但较小的燃油效益改善
Fcl	2.2%	0.8%	2.0% 1990-2025 1.2% 1990-2100	1.1% 1990-2025 0.2% 1990-2100	3.6	1.6	FESG低增长方案, 技术与Fal方案一致
Fe1	3.9%	2.5%	3.5% 1990-2025 3.0% 1990-2100	1.4% 1990-2025 0.7% 1990-2100	10.1	4.4	FESG高增长方案, 技术与Fal方案一致
Eab	4.0%	3.2%			10.7	6.6	环境保卫基金 (EDF) 根据IS92a制定的运输增长方案; 预测有非常低的NO _x 排放技术
Edh	4.7%	3.8%			15.5	9.4	高运输增长EDF方案; 预测有非常低的NO _x 排放技术。

¹运输以收费旅客公里计算

²全部航空 (旅客、货运和军事)

排放物, 以及最大限度使用空域的可能性, 即在2050年实现理想的空中交通管理。如果这些改进不能实现, 那么燃油使用和排污量就会上升。同时还预测航空器和机场的数量以及辅属的基础设施将继续增加, 并不对航空旅行需求的增长进行限制。如果没有这些基础设施, 方案所反映的运输增长就不可能实现。

IPCC (1992)⁷ 根据对1990-2100年期间人口和经济的增长、土地使用、技术变化、能源可用性和燃料混合的预测制定了一系列未来温室气体和

烟雾前期排放方案, IS92a-f。IS92a是一个中期的排放方案。未来的排污方案不是对未来的预测。基于它们对未来有不同的预测, 它们向来是不确定的, 时间的水平线越长, 方案就越不确定。在这里制定的航空器排放方案使用的是IS92方案中对经济增长和人口的预测(见表1和图1)。在下列段落中, 使用Fa1方案来举例说明航空器的可能影响, 它被称为参考方案。它的预测与IS92a有关连。其他的航空器排放方案是IS92a-e经济和人口预测的基础上制定出来的。这些方案代表了一系列貌似有道理的航空增长, 并以此为基础对气候模型敏感性进行分析。但是高增长方案Edh就认为不是很有道理, 考虑到工业的现状和计划的发展, 低增长方案Fc1很可能被突破。

4. 亚音速航空现在和将来对辐射加压和紫外线辐射的影响?

航空器发动机排放产生的辐射影响的结论列在表2和表3。如表2所示, 围绕这些影响的不确定因素是很大的。

4.1 二氧化碳

1992年航空器二氧化碳的排放是0.14Gt C/年。它占1992年整个人为二氧化碳排放的2%, 或占整个运输系统二氧化碳排放的13%。在此审议的方案预测航空器的二氧化碳排放将继续增长, 到2050年达到0.23至1.45Gt C/年。按照参考方案(Fa1), 二氧化碳排放到2050年会增长3倍, 达到0.40Gt C/年, 与中期IPCC排放(IS92a)相比, 约占整个人为二氧化碳预计排放的3%。就方案的范围而言,

2050年二氧化碳排放的增长范围要比1992的数值大1.6至10倍。

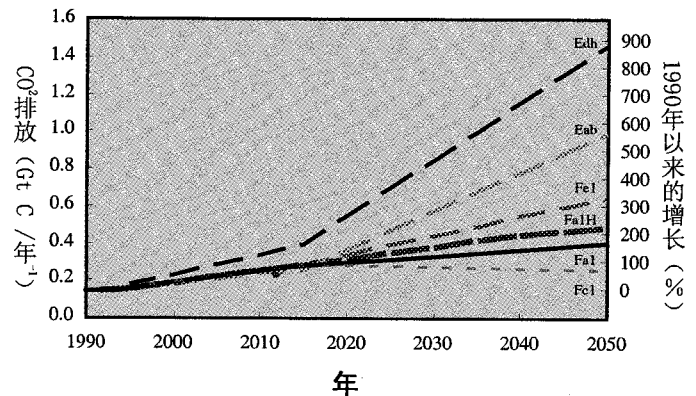


图1: 六种不同方案中使用航空燃油产生的全部航空二氧化碳的排放。每年的排放以Gt C标明[或10亿(10⁹)吨碳]。将Gt C转换成Gt CO₂乘以3.67。右边轴线的刻度代表1990至2050年的增长率。航空器1992年二氧化碳的排放占整个矿物燃料二氧化碳排放的2.4%, 或整个人为二氧化碳排放的2%。(注: Fa2未被列出, 因为它与Fa1的区别不能在表中辨别。)

今天二氧化碳的含量和辐射加压是过去100年的排放产生出来的。由航空促成的大气中二氧化碳含量在1992年为1ppmv, 仅占1%由人类活动引起的增长。这个百分比低于排放的百分比(2%), 因为排放仅发生在过去的50年当中。根据表1中的方案, 今后50年由于航空器产生的大气二氧化碳积累预计增加5至13ppmv。就参考方案而言(Fa1), 它占IPCC方案(IS92a)中期范围预测的整个人类活动排放的4%。

4.2 臭氧

1992年, 与没有航空器排放的大气层相比较, 亚音速航空器排放的NO_x预计导致北部中纬度巡航高度层的臭氧含量上升了6%。根据参考方案(Fa1), 臭氧增加预计在2050年约上升13%。世界其他地区对臭氧含量的影响相当小。臭氧含量的上升也均衡地使地球表面变暖。

航空器排放的NO_x在对流层顶部产生臭氧要比同等数量的排污在地面产生臭氧更有效。对流层顶部臭氧的增长比低高度更有效地使辐射加压上升。由于这种增长, 经过计算在北部中纬度的整个臭氧含量在1992年和2050年预计将分别增长0.4和1.2%。然而航空器排放在同温层里的硫磺和水要消

⁷ IPCC, 1992, 气候变化1992: 对IPCC科学评估的补充报告, Houghton J.T., B.A. Callander, 和 S.K. Varney (eds), 剑桥大学新闻出版社, 剑桥, 英国, 200 pp

耗臭氧，因此部分地抵销了由NO_x诱发产生的臭氧的增加，其程度尚不能量化。因此需要进一步评估亚音速航空器排放物对同温层臭氧的影响。经计算，由于航空器排污引起臭氧的大量增长主要发生在靠近在自然变化很大的对流层，从目前的观测来看这种变化尚不十分明显。

4.3 甲烷

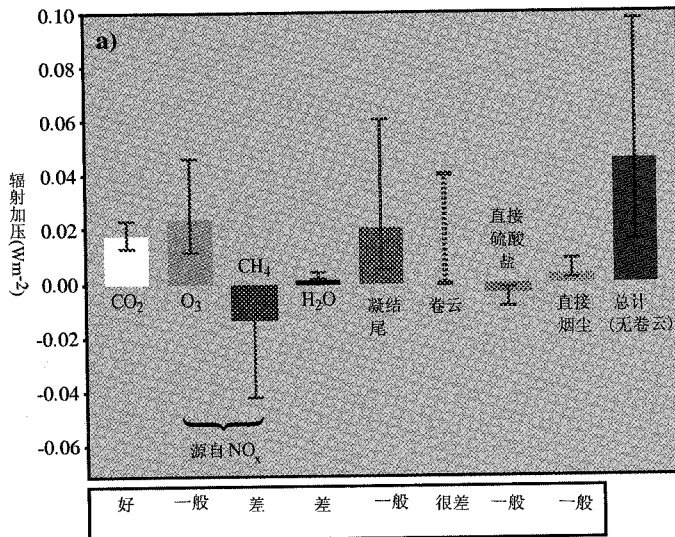
航空器排放的NO_x除了增加对流层的臭氧含量之外，预计还会降低甲烷的浓度。甲烷也是一种温室气体，它的减少会使地面表面变冷。1992年甲烷浓度预计要比没有航空器的大气中少2%。航空器引起甲烷含量的降低要比自工业化前以来观测到的2.5倍整体的增加要小得多。甲烷来源和下降的不确定因素妨碍了用大气观察检验航空对甲烷浓度的影响。在参考的方案中(Fa1)，经过计算，2050年没有航空器的大气甲烷要少5%。

对流层臭氧的变化主要发生在北半球，而甲烷的变化是全球性的，因此尽管全球平均辐射加压具有相同的强度和相反的迹象，纬度加压的结构不尽相同，因此纯局部的辐射影响没有抵消。

4.4 水蒸气

大多数亚音速航空器水蒸气的排放释放在对流层，它们在1至2周内迅速被沉降物清除掉。一小部分水蒸气排在较低的同温层，它在那里可以产生很大的含量。因为水蒸气也是一种温室气体，它的增加会使地球表面变暖，但对亚音速航空器而言，它的影响比航空器排放的诸如二氧化碳和NO_x的影响要小。

1992年航空器的辐射加压



2050年航空器的辐射加压

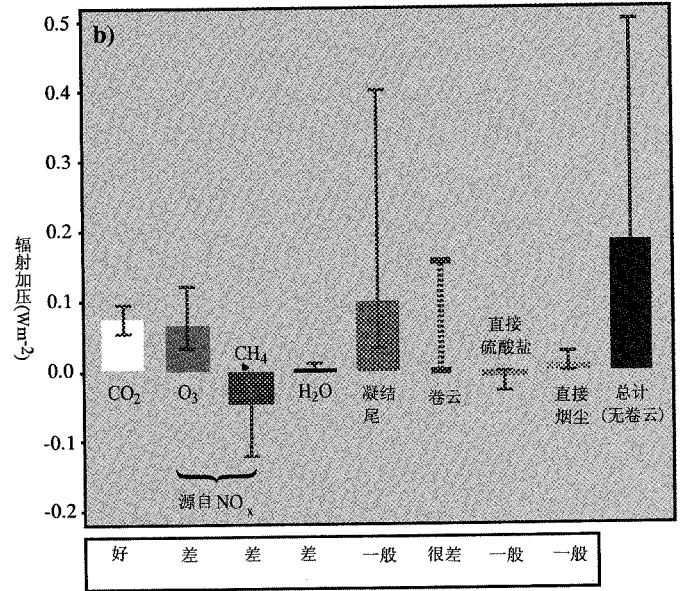


图2, 1992 (2a) 和2050方案Fa1 (2b) 亚音速航空器排污全球及每年平均辐射加压 (Wm⁻²) 的预测。图2b比图2a的比例大4个因数，圆柱体表示最好预测，而其中的线是使用目前的最佳知识和工具制定的三分之二不确定范围。(三分之二不确定范围是指真实值属于这一范围有61%的概率)。没有足够的卷云的资料以确定最佳预测和不确定范围。长划的线表示可能的最佳预测的范围。对整体加压的预测未包括卷云云量变化的影响。对整体辐射加压的航观测(不包括额外的卷云)是按照每一不同组成部分上下范围平方数目的平方根来计算的。在每一图形下方的评估(“好”、“一般”、“差”、“很差”)是对于每一个组成的评价，并代表了科学理解的程度。根据现有的证据的数量来支持最佳预测和其不确定性、科学文献的一致性和分析的范围。这个评估与圆柱体中直线代表的不确定范围是分开的。这种介绍的方法气候变化的科学比《1995年气候变化》：中用类似图表表示的信心程度不同而且更有意义。

4.5 凝结尾流

1992年航空器的线状凝结尾流每年平均预计覆盖0.1%的地球表面并具有很大的地区性。凝结尾流象薄高云一样会使地球表面变暖。在参考方案中(Fa1)，到2050年它会增长到覆盖0.5%的地球表面，其速度快于航空器燃油消耗的增长率。因为航空运输的增长主要发生在对流层顶部，凝结尾流在此很容易形成，预计凝结尾流覆盖会快速增长，航空器燃油效益的改善也会发生这种情况。

凝结尾流是由航空器排放的水蒸气促成形成的,它们的光学特征取决于航空器烟缕排放或形成的颗粒以及周围的大气条件。凝结尾流的辐射影响取决于它们的光学特性和全球覆盖,二者都不能确定。卫星在繁忙运输地区观测到的凝结尾流呈线状云,1996—1997年在中欧平均覆盖0.5%的地区。

4.6 卷云

经观测,持续的凝结尾流形成之后会发展成大量的卷云。在数量不多的研究中发现,卷云覆盖的增长(除那些被确定为呈线状的凝结尾流之外)确实与航空器的排放有直接关系。地球的30%大约被卷云覆盖。卷云覆盖的增加会使地球表面均衡变暖。90年代末期航空器产生的卷云预计覆盖地球表面0至0.2%的范围。根据Fa1方案,到2050年它会增长4倍(0至0.8%),但是与卷云增长有关的机制尚未得到很好地理解,需要进一步的调查。

4.7 硫酸盐和烟尘烟雾

1992年航空器产生的烟雾质的含量与地面源造成的烟雾相比要小。尽管航空燃油的使用会使烟雾的积累增长,但预计2050年航空器产生的烟雾质含量与地面源产生的烟雾相比仍然很小。烟尘的增加会使地球变暖而硫酸盐的增加会使地球表面变冷。航空器产生的硫酸盐和烟尘烟雾导致的直接辐射加压与航空器的其他排放相比要小。因为烟雾会对云的形成产生影响,航空器烟雾的积累会对加速云的形成起作用,并改变云的辐射特性。

4.8 亚音速航空器的整体气候影响?

可以用辐射加压的概念,对不同人为排放对气候的影响进行比较。1992年对航空器辐射加压的最佳预测为 0.05Wm^{-2} ,或占全部人类活动造成的辐射加压的3.5%。根据参考方案(Fa1),预计2050年航空器在IS92a中期范围的辐射加压为 0.19Wm^{-2} 或5%(比1992年值大3.8倍)。根据在此审议的方案,加压预计到2050年会上升0.13至 0.56Wm^{-2} ,比Fa1低1.5倍或高3倍,要比1992数值高2.6至11倍。这些加压的预测综合了二氧化碳、臭氧、甲烷、水蒸气、线状凝结尾流和烟雾含量变化的影响,但不包括卷云可能的变化。

表2列出了根据参考方案(Fa1),1992年和2050年全球不同组成部分辐射加压的平均值。表2显示

了对每一组成部分加压的最佳预测和三分之二不确定范围⁸。这些不确定范围的出处包括专家科学的判断并可能包括客观的统计数字模型。这里所说的辐射加压不确定范围包括在计算温室气体和烟雾对大气变化时的不确定性和用此计算对辐射加压的不确定范围。至于额外卷云的云量,只提供了一个最佳预测的范围,它并未被列入整体辐射加压。

对每一组成部分的科学理解状况都进行了评估。它与IPCC以前文件所表示的信任程度不一样。这个评估与不确定范围有区别,是对每一个组成部分科学理解的鉴定。评估基于现有证据的数量,以支持最佳预测和其不确定因素、科学文献一致性的程度以及分析的领域。表3列出1990年至2050年航空增长在任一六个方案里面的整体加压。

航空引起的辐射加压(不包括额外的卷云的加压)在1992年可能处于0.01至 0.1Wm 范围之间,其中大部分不确定性来自凝结尾流和甲烷。这样的话整体辐射加压可能会比最佳预测大2倍或小5倍。按照2050年的任何方案,辐射加压的不确定范围要比1992年的稍大,但预测的整体加压的最大变化来自方案的范围。

1992年至2050年期间,在这份报告里面所有方案当中航空器的整体辐射加压(不包括卷云变化)要比航空器二氧化碳单独造成的加压大2至4倍。人类全部活动产生辐射加压的数量预计要比二氧化碳单独造成的加压大1.5倍。

NO_x 的排放导致了甲烷和臭氧的变化,它们都会对辐射加压产生影响,但是其严重性相同而特征相反。但如前注意到的那样,航空器臭氧加压的地理分布远比航空器的甲烷加压更具地区性。

航空器对气候的影响加重了人类温室气体和颗粒的排放对气候产生的影响,并加剧了自然变化的背景。源自航空器的辐射加压1992年占整体辐射加压的3.5%。目前尚不可能将航空对全球气候变化的影响(或任何其他产生同样加压的部门)与其他人类活动区别开来。航空器对全球变化的贡献与它对辐射加压所起的作用是成正比的。

⁸ 三分之二不确定范围意味着有67%的概率真实值是属于这一范围内。

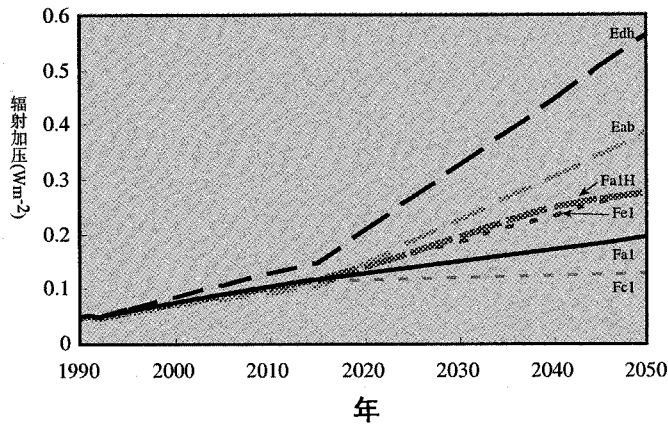


图3, 1990年至2050年期间, 航空增长在任一六个方案中, 与全球及每年的整体辐射加压(不包括卷云)有关的航空排放的预测。(没有画出Fa2, 因为它与FaI方案的区别不能在图中辨别)

4.9 亚音速航空器对UV-B的整体影响?

臭氧的绝大部分滞留于同温层, 是防止太阳紫外线辐射的屏障。预计航空器1992年7月在北纬45°地区将红斑剂量率(称为UV发光, 是根据其如何有效地造成晒斑加以衡量的)降低了0.5%。为了比较, 经计算1970年至1992年每年7月在北纬45度, 根据观测到的臭氧破坏造成的红斑剂量率约增加了4%⁹。由于航空器NO_x的排放, 亚音速航空器纯粹的影响似乎增加了臭氧容量并降低了UV辐射。UV辐射很小的变化与航空器的凝结尾流、烟雾和由此产生的云量有关。在南半球, 由于航空器排放对红斑剂量率经过计算的影响要比北半球大约小4倍。

在参考方案中(FaI), 2050年7月北纬45度红斑剂量率的变化与没有航空器的模拟比较为-1.3% (三分之二不确定范围为-0.7至-2.6%)。为了比较, 1970年至2050年在北纬45度, 经计算航空器以外的, 其他微量物质浓度变化而导致的红斑剂量变化率是一3%, 这种降低是二种反作用的最终结果: (1) 由于含卤素化合物的寿命很长, 同温层臭氧尚未完全恢复至1970年的水平, (2) 地球表面排放的寿命较短的污染物预计的增加, 它在对流层产生臭氧。

5. 超音速航空现在和将来对辐射加压和紫外线

辐射的影响?

发展第二代超音速、高速民用航空运输机(HSCT)机队是未来的一种可能性, 尽管是否发展这类机队尚不完全确定。超音速航空器的巡航高度预计为19公里, 比亚音速航空器高8公里, 并在同温层排放二氧化碳, 水蒸气, NO_x, SO_x和烟尘。超音速航空器排放的NO_x、水蒸气和SO_x都对同温层臭氧的变化产生作用。FaIH方案中, 民用超音速航空器的辐射加压预计要比所替换的亚音速航空器大5倍。计算超音速航空器的辐射加压取决于对模型中水蒸气和臭氧的处理。现有的模型难以对其影响进行模拟, 因此很难确定。

FaIH方案审议了民用超音速航空器的机队预计在2015年开始加入运营, 2040年这些航空器会增加到1000架。便于参考, 1997年底民用亚音速机队大约有12000架航空器。在此方案中, 航空器设计巡航速度为2.4马赫, 采用新技术预计每公斤燃油保持5克NO₂排放量(低于今天民用超音速航空器每公斤燃油22克NO_x的排放量)。超音速航空器预计要取代部分亚音速机队(约等于FaI方案中11%的排放量)。与亚音速航空器相比, 超音速航空器每客公里耗油量比亚音速航空器多二倍。到2050年, 综合机队(FaIH方案)要比FaI方案中0.19Wm⁻²的辐射加压再增加0.08Wm⁻²(42%)(见图4)。大部分是由于同温层水蒸气积存造成的。

引入民用超音速机队组成混合机队(FaIH)的影响也会减少同温层的臭氧和增加红斑剂量率。经计算北纬45度受到的影响最大, 超音速和亚音速混合机队2050年7月对臭氧量产生的变化与没有航空器相比为-0.4%。超音速航空器本身对臭氧容量的影响为-1.3%, 而亚音速机队为+0.9%。

与没有航空器的大气相比较, 整个混合机队2050年7月在北纬45度会使红斑剂量率发生+0.3%的变化。混合机队三分之二不确定范围为-1.7%至+3.3%。这可以与FaI预计-1.3%的变化进行比较。飞得高会导致大量臭氧容量的降低, 飞得低会导致少量臭氧容量的降低, 在同温层的最低层飞行

⁹ 这种数值是根据卫星观测和模型计算, 见WMO, 1999: 对臭氧破坏的科学评估: 1998报告44号, 全球臭氧研究和监测项目, 世界气象组织, 日内瓦, 瑞士, 732pp

甚至会使臭氧容量增加。除此之外，超音速航空器在北半球同温层的排放物会漂移到南半球，它们会破坏那里的臭氧。

2050年超音速机队的辐射加压

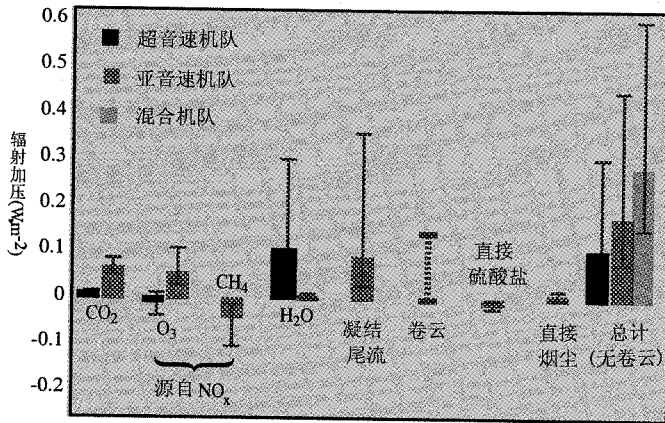


图4: 在FalH方案中, 亚音速和超音速混合航空器机队 (以 Wm^{-2} 表示) 由于温室气体、烟雾和凝结尾流在2050年的变动引起的全球和每年平均的辐射加压的预测。在这个方案中, 超音速航空器预期要替代部分亚音速航空器 (等于Fal方案中11%的排放量)。圆柱体表示了对加压的最佳预测, 与之相连的每一条线是利用目前的最佳知识和工具制定的三分之二不确定范围(三分之二不确定范围系指67%真实值的概率属于此范围内)。尚没有足够的资料以确定卷云的最佳预测和不确定范围; 长划的线表示可能的最佳预测范围。对整体加压的预测并未包括卷云云量变化的影响。对整体加压的不确定的预测 (不包括额外的卷云) 是以上、下范围平方数的平方根计算的。对超音速构成部分的科学了解程度为二氧化碳“好”, 臭氧“差”, 水蒸气“差”。

6. 减少排放和其影响的其他做法?

目前有一系列降低航空排污影响的选择方案, 包括航空器和发动机技术的变化、燃油、运营方面的做法, 以及规章和经济措施。它们可以单独或与公共和私人部门联合实施。在这份报告中介绍的大量航空器和发动机技术上的进步和空中交通管理的改善都已被纳入航空器排放方案中, 用来计算气候变化。但这个方案没有对其他也有可能降低排放的运营措施和燃油替代物进行预测。未来的技术进步还有使燃油消耗和排放进一步降低的潜能。在实际做

法上, 某些改进预期会由于商业原因而发生。规章、经济和其他选择方案的时机和范围可能会影响这些改善的实施, 同时也会影响对航空运输的需求。降低水蒸气和云量的方案尚未进行全面的研

在购买新的航空器或对潜在的工程及运营变化进行评估时, 航空业首要考虑的是运营的安全、运营和环境性能以及成本。一架航空器的基本寿命为25—35年。在评估技术进步速度和减少与航空排放技术有关的方案时应该考虑到这些因素。

6.1 航空器和发动机技术的选择方案

技术进步很大程度上已经降低了每客公里大多数的排放量。但是还有进一步改善的潜力。技术的任何变化可能牵涉一系列环境影响的平衡。

今天制造的亚音速航空器每客公里燃油效益比40年前提高了70%, 很大程度上是通过改进而实现的, 剩余部分是对机身设计的改进。到2015年和2050年, 燃油效益会比今天生产的航空器分别改善20%, 40%—50%。为这份报告制定的2050年方案在预测燃油使用和排放时已考虑到了未来燃油效益的增加。发动机效益的改善减少了专用燃油消耗及多种类型的排放物。但是凝结尾流可能增加, 如果燃烧室技术没有进步, NO_x 的排放也会增加。

未来的发动机和机身的设计包含复杂的决策制定过程和众多考虑因素的折衷方案, (如二氧化碳排放、 NO_x 在地面的排放、 NO_x 在高空的排放、水蒸气排放、凝结尾流和卷云的产生以及噪音)。这份报告没有详尽地叙述和量化这些因素。

国际上, 重大的发动机研究项目正在进展之中, 目标是将今天规则标准的降落和起飞循环(LTO) NO_x 排放减少70%以上, 同时到2010年将目前生产的发动机的燃油消耗改善8%—10%。还将降低 NO_x 巡航高度的排放, 尽管其比例不会与LTO一致。如果这些目标得以实现, 向目前正在服役的众多新制造的航空器的技术转让将会耗时很长, 大约十年。解决超音速航空器 NO_x 排放的研

究项目也在进展之中。

6.2 燃油选择方案

今后几十年中看起来不会有替代以煤油为基础的燃油供商业喷气航空器选择。减少煤油里面的硫磺成分会降低 SO_x 排放和硫磺颗粒的形成。

喷气航空器需要高能量比的燃油，特别是用于远程飞行。其他燃油的可行性，如氢燃料，从长远来说是可行的，但是需要对航空器进行新的设计以及新的供油基础设施。氢燃料可以消除航空器二氧化碳排放，但会增加水蒸气的排放。氢燃料和其他替代燃料的生产和使用对整个环境的影响和环境的承受能力尚未确定。

航空器排放的硫酸盐颗粒的形成取决于发动机和卷流的特征，它会因为燃油硫磺成分的降低而减少。现在已具备几乎消除全部燃油硫磺的技术，但会降低润滑性。

6.3 运营方案

空中交通管理(ATM)和其他运营程序的改善可以将目前的航空燃油消耗降低8-18%。这种降低大部分(6-12%)来自于ATM的改善，它预期在未来的20年中能得以全面实施。其结果是降低了所有发动机的排放。此份报告审议的全部航空排放方案都已经考虑到了ATM改善带来的排放降低。实施改善的ATM的进度取决于国际上关键的体制安排的实施。

空中交通管理系统被用来引导、间隔、协调和管制航空器的活动。现有的国内和国际空中交通管理系统存在限制，因此造成了比如，空中等待(在固定模式中飞行的航空器等待降落许可)，效益不好的航路和不甚理想的飞行剖面。这些限制造成了过多的燃油消耗以及随之而来的过多的排放。

按照现有的航空器机队和运营，解决上述空中交通管理的限制可以将燃油消耗降低6%-12%。如果必要的体制和规则方面的安排及时到位的话，为

降低燃油消耗的这些改进预计要在今后的20年中才能得以全部实施。这份报告制定的方案在预测燃油使用时设想到了ATM改善的及时实施。

降低每客公里燃油消耗的其他运营措施包括提高载运比(在一特定航空器上运载更多的旅客和货物)，减轻不必要的重量，提高航空器速度，限制使用辅助动力(加温，通风)和减少滑行。运营措施改进的潜力可以将燃油消耗和排放降低2-6%。

改善后的运营效益可能吸引更多的空中交通，尽管尚未对提供此类存在影响的证据进行研究。

6.4 规章、经济和其他选择方案

尽管航空器和发动机的技术改进和空中交通系统效率的改善会带来环境效益，但这不能全部抵消航空预期增长而增加的排放。进一步降低排放的方案包括更严格的航空器发动机排放规定，取消对环境产生负面后果的补贴和奖励，基于市场的其他方案，如征收环境税(收费和收税)，排放贸易，自愿协议，研究项目，用铁路和长途汽车替代航空，大部分方案会导致航空公司成本上升和提高票价。在航空领域尚未对这些方法进行全面的调查和试验，其结果尚不清楚。

发动机排放的适航是降低具体排放的一个方法。航空当局现在使用这种方法来管理一氧化碳、碳氢化合物、 NO_x 和烟的排放。国际民航组织已开始评估是否有必要制定航空器在巡航高度的排放标准以补充现有的LTO NO_x 和其他排放的标准。

基于市场的选择方案，如环境征税(收费和税收)，和排放贸易具有鼓励技术创新、改善效益和减少对航空旅行需要的潜能，许多这些想法在航空业还未得到充分的调查或试验，其结果尚不得知。

环境征税(收费和税收)应能成为降低航空排放增长的一种方法,可以用鼓励发展和使用更有效益的航空器和降低对航空运输增长的需求达到这个目标。研究表明,为使环境更有效,需要在国际框架下解决征税的问题。

为降低航空排放可考虑的另外一种想法是排放贸易,这个基于市场的想法能够使参与者合作最大限度地降低排放费用。排放贸易尚未在航空界进行试验,但在美国使用过硫磺 dioxide (SO₂) 的排放贸易,并可能适用于蒙特利尔议定书里面的破坏臭氧物质。这种方法是京都议定书的规定之一,适用于附件B的当事国。

目前正在对作为实现减少航空排放一种方法的自愿协议进行探讨。在其他领域已经使用这种协议减少温室气体排放或增强下沉。

其他可供考虑的措施是取消补贴和鼓励,它们对环境后果和研究项目带来负面影响。

用铁路和长途汽车替代可以降低每一旅客公里二氧化碳的排放。这种范围限于高密度、短程航线,那里有长途汽车和铁路交通。预测显示在欧洲10%的旅行者会从航空器转到高速火车。需要对影响环境范围广泛的折衷方案进行分析,比如接触到的噪音、当地空气质量和全球大气效应,来探讨替代的可能性。

7. 今后的议题

这份报告在不同方案里面对航空器在2050年以前导致气候和臭氧变化的可能性进行了评估。它意识到某些种类的航空器排放已得到了很好的理解。它还显示出由于众多科学不确定因素,其他排放的影响尚未得到理解。在描述人类活动潜在影响,包括航空对全球大气的影响方面已取得扎实的进步。这份报告还审议了用以降低航空排放的技术进步、基础设施的改善和基于市场的措施。需要进一步工作来减少科学和其他方面的不确定因素,更好地理解降低排放的选择方案,更好地向决策者通报,以及改善与航空运输需求有关的社会和经济事宜的理解。

一些关键领域的科学不确定因素限制了我们的预测航空对气候和臭氧产生影响的能力:

- 凝结尾流和烟雾对卷云的影响
- NO_x改变臭氧和甲烷含量的作用
- 烟雾改变化学反应过程的能力
- 大气气体和颗粒在对流层顶部和同温层底部的移动
- 气候对局部加压和同温层变动的反应

还需要更好的明确某些关键的社会—经济和技术事宜;包括

- 明确对商业航空服务的需求,包括机场和航路基础设施的制约以及与之相关的技术变化
- 用于评估规章及基于市场选择方案的外部费用和环境效益的方法
- 对缓解措施使航空业降低排放的宏观经济影响的评估
- 减少引起凝结尾流的形成和云量增加的排放的技术能力和运营作法
- 对满足可能的稳定方案(温室气体的大气含量)的经济和环境影响的理解,包括减少航空排放的措施和包括不同运输方式对环境造成影响的事宜。

I. IPCC第一次评估报告, 1990年

- 1) 气候变化 – IPCC科学评估。IPCC科学评估工作组1990年报告 (此外还有中文、法文、俄文和西班牙文)。
- 2) 气候变化 – IPCC影响评估。IPCC影响评估工作组1990年报告 (此外还有中文、法文、俄文和西班牙文)。
- 3) 气候变化 – IPCC响应战略。IPCC响应战略工作组1990年报告 (此外还有中文、法文、俄文和西班牙文)。
- 4) 概况和决策者摘要, 1990年。

排放构想 (由IPCC响应战略工作组撰写), 1990年。

沿海地区对海平面上升脆弱性评估 – 共同方法, 1991年。

II. IPCC增补件, 1992年

- 1) 气候变化1992 – IPCC科学评估增补报告。IPCC科学评估工作组1992年报告。
- 2) 气候变化1992 – IPCC影响评估增补报告。IPCC影响评估工作组1992年报告。

气候变化: IPCC 1990和1992年评估 – IPCC第一次评估报告概况和决策者摘要及1992年IPCC增补件 (此文还有中文、法文、俄文和西班牙文)。

全球气候变化和出现的海洋挑战。IPCC响应战略工作组海区管理分组, 1992年。

IPCC国家研究研讨会报告, 1992年。

气候变化影响评估初步指南, 1992年。

III. IPCC特别报告, 1994年

气候变化1994 – 气候变化辐射强迫和IPCC IS92排放构想评估。

IV. IPCC第二次评估报告, 1995年

- 1) 气候变化1995 – 气候变化科学 (含决策者摘要), IPCC第一工作组报告, 1995。
- 2) 气候变化1995 – 气候变化影响、适应和减缓科技分析 (含决策者摘要), IPCC第二工作组报

告, 1995。

- 3) 气候变化1995 – 气候变化经济和社会方面 (含决策者摘要), IPCC第三工作组报告, 1995。
- 4) 第二次评估 IPCC有关联合国气候变化框架公约关于气候变化第二款解释的科技信息综述, 1995。

(请注意: IPCC综述和三个决策者摘要已经以单行卷发行, 并有阿拉伯文、中文、法文、俄文和西班牙文)。

V. IPCC方法论

- 1) IPCC国家温室气体清单指南 (3卷), 1994年 (此外还有法文、俄文和西班牙文)。
- 2) IPCC评估气候变化影响及适应技术指南, 1995年 (此外还有阿拉伯文、中文、法文、和西班牙文)。
- 3) 1996年IPCC国家温室气体清单指南修订本 (3卷), 1996年。

VI. IPCC技术报告

- 减缓气候变化的技术、政策和措施 – IPCC技术报告一, 1996年 (此外还有法文和西班牙文)。
- 用于IPCC第二次评估报告的简单气候模式介绍 – IPCC技术报告二, 1997年 (此外还有法文和西班牙文)。
- 稳定大气温室气体 – 物理、生物和社会经济影响 – IPCC技术报告三, 1997年 (此外还有法文和西班牙文)。
- 二氧化碳排放限制建议的影响 – IPCC技术报告四, 1997年 (此外还有法文和西班牙文)。

VII. IPCC特别报告, 1997年

气候变化区域影响: 脆弱性评估 (含决策者摘要, 有阿拉伯文、中文、英文、法文、俄文和西班牙文)。

IPCC第二工作组的特别报告, 1997。

VIII. IPCC特别报告, 1999

航空和全球大气 (含决策者摘要, 有阿拉伯文、中文、英文、法文、俄文和西班牙文)。

IPCC第一、第二工作组的特别报告, 1999。