免责声明：凡在本杂志发表的文章只代表作者观点，而非美国国防部、空军部、空军教育和训练司令部、空军大学或美国其他任何政府机构的官方立场。

用寿命周期评估法比较JP-8航空油和替代燃料

Jet Propellant 8 versus Alternative Jet Fuels: A Life-Cycle Perspective

彼得・P・冯，美国空军中校 / 博士（Lt Col Peter P. Feng, PE, PhD, USAF）
韦恩・C・金赛尔，美国空军少校（Maj Wayne C. Kinsel, USAF）
阿尔弗雷德・E・泰尔博士（Alfred E. Thal, PhD）
查尔斯・A・布雷克曼博士（Charles A. Bleckmann, PhD）*

美国空军是国防部系统内最大的喷气发动机燃料用户，每年消耗量达到 24 亿加仑。[1] 由于不可再生燃料资源的消耗对环境造成破坏，又因为依赖外国石油供应对国家安全构成忧患，美国理所当然地把目光转向替代燃料。国防部和空军的能源战略都指出开发和生产替代燃料的必要性。国防部承诺要确保能源安全，并制订了能源计划，承诺“将尽力实现基础设施现代化，提高能源利用率和节省能源，大力降低需求，并且改善能源灵活性，从而节省纳税人的金钱，减少导致空气污染和全球气候变化的废气排放。”[2] 这个计划有下列四个目标：

1. 在减少部队的整体能源需求的同时，保持或提高**作战效率**。
2. 开发替代性 / 有保障的燃料和能源，提高能源战略的**弹性应变能力**。
3. 在国防部**规划和事务处理流程**中实施**能源考量和解决方案制度化**，从而提高作战和事务处理效率。
4. 在整个国防部系统内建立和监控能源**统计管理制度**（黑体强调来自原文）。[3]

EIO-LCA = 经济投入产出寿期评估法
EIO = 经济投入产出模型
LCA = 寿期评估模型
CBTL = 煤及生物质转化为液体的工艺流程
FT process = 费—托（或 FT）合成燃油工艺
GWP = 全球增温潜势值

空军积极配合国防部的努力，在其军种能源计划中提出了与之呼应的愿景：“一切工作考虑能源因素。”[4] 空军的能源战略包含实现这个愿景的三项原则措施：

1. **减少需求**——节省能源，减少使用，提高我军能源效率，并增强每个人对减少能源消耗的必要性的认识。
2. **增加供应**——通过研究、测试和认证新技术，包括可再生能源、替代能源和传统能源，美国空军可以对建立新的国内供应源做出贡献。
3. **改变文化**——空军必须创建新文化，使空军全体官兵在日常一切行动中都要考虑能源因素。[5]

本文论述空军能源战略的第二项原则措施以及下列具体目标：“做好准备，到 2016 年，空军国内航空油需求中混合燃料的使用比例达到 50%，此混合燃料应具有成本竞争力，且混合到燃料中的新燃料即替代燃料由美国国内生产，其生产方式比用常规石油生产的燃料‘更加绿色’。”[6] 这个目标带来几个问题。不错，使用“更绿”燃料是一个高

* 冯博士，加州大学伯克利校区博士，现为注册专业工程师，美国空军理工学院助理教授。金赛尔少校是俄亥俄州莱特—帕特森空军基地空军装备司令部总部A6/7通信、设施及使命支援部设施能源团队主任。此前他曾在空军土木工程界从事研究生学业，并担任作战飞行指挥官、工程飞行指挥官、基地发展主管，及设计土木工程师。泰尔博士是退役空军土木工程师军官，现任空军理工学院工程管理副教授，科研领域包括发明创新、可持续发展和项目管理。布雷克曼博士是空军理工学院环境管理教授，科研领域涉及碳氢化合物生物降解与补救、燃料的氧化生物降解、燃料的微生物污染、蜘蛛网作为环境监视器，以及藻类植物作为生物燃料来源。

尚的追求，但是我们如何正确评估此类燃料？在此形势下，“更绿”的真实含义是什么？我们如何评定所提议的某种生物燃料比空军目前使用的喷气发动机燃料 JP-8 航空油更加绿色？为了回答这些问题，本文采用寿命周期综合分析的方法，因为许多现代燃料系统都很复杂，包含相互依存的流程和活动。本文首先介绍与生物燃料相关的背景资料，然后应用经济投入产出寿期评估法（EIO-LCA），把石油基喷气发动机燃料（以 JP-8 航空油为例）与替代燃料，即基于煤及生物质转化为液体的工艺流程（CBTL）的燃料进行对比，计算出这两种燃料在整个寿命周期的全球增温潜势值（GWP）。EIO-LCA 比较结果可让空军领导人在评估空军能源战略的各种实施方案时有一个考虑基础。

背景介绍

在提出和讨论 EIO-LCA 比较结果之前，本文将论述与燃料燃烧相关的环境问题，界定和介绍各类不同的替代燃料，包括空军提议的替代燃料；然后解说寿期评估法。

环境问题

温室气体会在地球大气层中截留热量。根据能源信息管理局公布的资料，“这些气体让阳光自由地进入大气层。阳光照射到地球表面时，一部分光线会以红外辐射（热量）的形式向太空反射。温室气体吸收这些红外辐射，将其热量截留在大气层。”[7] 有些温室气体是自然产生的，但是人类活动往往会增加温室气体排放。人类活动，主要是化石燃料的燃烧导致温室气体进入大气层，这些气体大多是二氧化碳、甲烷、一氧化二氮和含氟气体。[8]

替代燃料

根据国防部公布的定义：“使用‘替代’燃料一词，可区别用原油生产的柴油类喷气发动机基准燃料和用非原油类物质生产的合成燃料。替代燃料应该具有基准燃料的属性，以提高其在军用装备中的互换性。”[9] 替代燃料若要获得合格认证，必须具有 JP-8 航空油的属性（产生同样的单位能量输出），以确保不降低飞行安全性。

空军替代燃料计划的目标是，无论是加注喷气发动机碳氢燃料还是混合燃料，都保证百分之百的“加注即用”。“加注即用”意味着这些新型燃料在性能和使用方式上可与当前航空燃料完全互换，对飞行安全性不会有任何损害。通常，混合燃料中包含对等比例的碳氢燃料（替代燃料）和石油基航空燃料。[10] 替代燃料通常以生物质为原料生产。目前，科研人员正在研究用三大类生物质生产地面车辆燃料和喷气发动机燃料，这三类生物质是：糖和淀粉，脂肪和油类，以及“木质纤维素”材料。玉米就是一种淀粉类生物质，在美国被广泛用于生产乙醇；但是乙醇的闪点低，燃烧热量不足，无法用作喷气发动机燃料。[11] 我们经常用甘油三酯——从油料作物种子提取的油脂——生产生物柴油，但是这种燃料只适合地面车辆，不能用于飞机。最后，柳枝稷是一种木质纤维素生物质，可用于生产航空燃料。本文讨论的替代燃料是基于这最后一类生物质。

生物燃料是否比传统的石油基燃料更有利于环境保护，专家们至今莫衷一是。反对生物燃料者认为它们对环境有害。例如，普林斯顿大学威尔逊学院生物燃料研究专家提摩西·瑟奇格（Timothy Searchinger）认为：“以前的论述［分析］是片面的，因为它们只说

了使用土地种植生物燃料作物有减少碳排放等好处，但是没有提到改变土地的目前用途而牺牲的碳成本、碳储藏和碳封存。”[12] 如果把目前的森林或草原变为耕地用于生产生物燃料，这种转化将把原先储藏在树木和其他植物里的二氧化碳释放到大气层中。

提倡生物燃料者认为用生物质生产生物燃料可获得减少碳排放的效果。丹麦罗斯基尔德大学生物燃料研究员本特·索然森（Bent Sørensen）不同意瑟奇格的观点，他声称:“瑟奇格认为……应该把所有的碳吸收和释放视为时间函数而与时间联系起来，而不能仅仅把生物质视为碳中性,这样才更像学术研究。这类学者中，有一些人最近攻击‘第二代’生物燃料，甚至预言生物燃料不久将完全用边缘地带种植的木质纤维素材料生产。”索然森进一步反驳说：实际上木质纤维素材料将来自目前已在世界各地运营的生物质种植场的下脚料，因此不会造成额外的碳排放。[13]

本文以柳枝稷作为 CBTL 基喷气发动机燃料的生物质原料。我们假定柳枝稷来自边缘或荒凉地带，不属于瑟奇格所述的改变土地用途去生产木质纤维素生物质的范畴。[14] 因此，我们分配了一个碳排放额度给 CBTL 基燃料的柳枝稷部分。根据代顿大学研究院的一份报告，对以生物质为原料的经由 Fischer-Tropsch（FT）合成燃油技术生成的喷气发动机燃料进行寿期评估时，可将柳枝稷的温室气体排放额度设定为 15%。[15] FT 工艺是把煤衍生的一氧化碳和氢、天然气或生物质转化成液体燃料，例如柴油或喷气发动机燃料。代顿大学研究院的那份报告列出的柳枝稷温室气体排放额度是每吨生物质为 50 至 100 公斤当量的二氧化碳。[16] 这项信息在进行寿期评估时有重要意义。

寿期评估

寿期评估（LCA ）法是一种整体分析方法，可用于评估任何产品、流程或活动在整个寿命周期中对环境的影响。这种评估的最单纯形式是，以从土地中初始萃取原材料开始，到所有材料返回土地结束。寿期评估经常被称为从摇篮到坟墓评估方法，其涉及的寿期包括五个阶段（图 1）。这些寿期评估方法“帮助我们寻找正确的途径，生产我们所需的能源而不耗尽该能量来源，并且不释放导致气候变化的温室气体。”[17]

因此，LCA 模型是重要的工具，鼓励各种项目的设计中重视绿色概念。[18] 它们还能向决策者提供额外的信息，帮助界定各类活

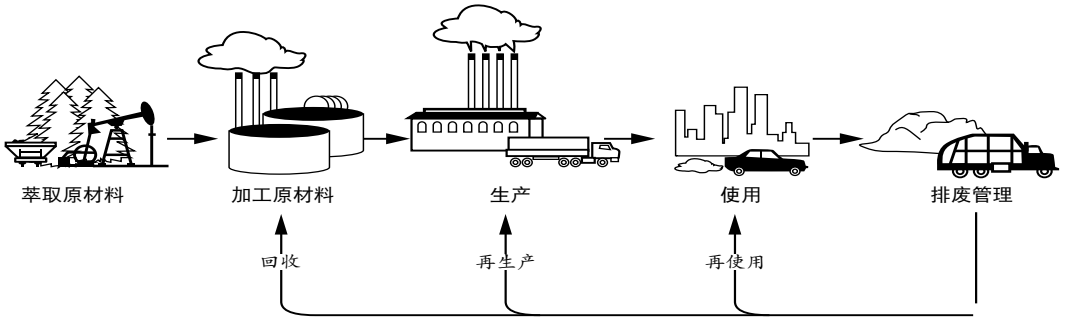

图 1：LCA 评估法各阶段示意图（取自 Congress of the United States, Office of Technology Assessment, Green Products by Design: Choices for a Cleaner Environment [设计和选用绿色产品：建设更清洁的环境], [Washington, DC: US Congress, Office of Technology Assessment, September 1992], 4.）

动的环境影响，发现改进的机会。LCA 模型有多种衍生版本，但基本类型只有三个：基于流程的模型、经济投入产出（EIO）模型和混合模型。这些模型通常使用类似的环境排放和资源条件，藉以确定与任何产品、流程或活动对应的环境负荷。但是，如果应用成本、反馈流量或分析速度是重要考虑因素，则 EIO-LCA 模型通常被认为更加有用。[19]

基于流程的寿期评估。基于流程的 LCA 法将一件产品或一项服务分解成小片，并追踪到每个小片的根源。这种 LCA 法能精确地分析出产品或服务对环境的影响。但是，基于流程的 LCA 法面临两个难题：分析界限和循环效应。由于整个流程及其所有的子流程很难捕获，研究人员必须非常谨慎地判断分析界限，确定需要排除的内容。循环效应的意思是，任何一件“东西”都是由其他许多“东西”而来的。例如，“制作一个纸杯需要用钢铁造的机器；但是制造钢铁造的机器需要用钢铁造的其他机器和工具；制造钢铁又需要用机器，而这些机器也是钢铁造的。实际上，如果要完成任何材料或流程的寿期评估，必须先完成所有相关材料和流程的寿期评估。”[20]

经济投入产出寿期评估。EIO 法综合利用来自美国经济分析署的经济数据和来自环保署及能源部的环境数据。EIO-LCA 评估模型以诺贝尔奖获得者瓦西里·列奥捷夫（Wassily Leontief）的 EIO 模型为基础。[21] 卡内基梅隆大学工程学教授克里斯·亨德里克森（Chris Hendrickson）说：

> 列奥捷夫提出一个一般均衡模型，用于指明任何一个经济部门生产一个产出单位而需要的来自所有其他部门的投入。他的模型立足于一个简化的假设：任何一个部门若要增加其货物或服务的产出，则需要来自所有其他部门的投入有成比例的增长。由此得到的 EIO 矩阵至今仍用于评估发达国家和许多工业化经济体。[22]

EIO-LCA 评估模型使用 EIO 矩阵和产业部门层面的环境与资源消耗数据，以评估产品和流程对经济层面的环境影响。[23] 这个方法简化了寿期评估的复杂性，利用数学公式将产业部门之间的货币交易转化成环境影响。[24] EIO-LCA 评估模型识别货物和服务的生产及消费对环境造成的直接、间接和整体影响。整体影响是直接和间接影响之和。[25]

混合寿期评估。混合模型融合了基于流程的 LCA 评估法和 EIO-LCA 评估法，以从某个物件或流程获得更准确的信息；当信息无法获得时，可使用 EIO-LCA 评估模型。例如：我们可能知道一个纸杯在使用阶段的环境影响，但是不知道原料萃取阶段的环境影响。在这种情况下，分析人员可以利用使用阶段的具体信息，然后使用 EIO-LCA 评估模型估算其他阶段的信息。本文的分析使用混合寿期评估模型。

确定燃料的“绿色程度”

美国能源部在 2009 年 1 月的一份报告中声称，CBTL 基燃料已经能够在经济层面与现有的石油基燃料进行竞争。具体而言，当原油价格等于或超过每桶 93 美元时，使用 8% 生物质（重量百分比）和 92% 煤（重量百分比）混合经由 CBTL 工艺流程生产的燃料就具有经济竞争力。此外，CBTL 基燃料的寿期温室气体排放量比石油基燃料低 20%。该报告还指出，即使 CBTL 基燃料不具有经济竞争力，它仍有两个明显的优势：(1) 它的温室气体排放量低；(2) 它能够利用国内资源

生产，从而可减少美国从外国进口的原油数量。[26]

CBTL 流程采用三种现有技术将煤和生物质转化成液体燃料，这三种技术是：气化、FT 合成、以及碳捕获和封存。气化技术将煤和生物质转化成一氧化碳和氢，这种混合物通常称为“合成气”。FT 合成技术对合成气加热和加压,使其与催化剂（例如钴）起反应，生成液体燃料。[27] 同时对产生的二氧化碳副产物用称为碳捕获封存技术的低成本流程进行捕获和封存，有助于降低替代燃料的价格和减少温室气体排放。剩余的有毒一氧化碳气体用作燃料，产生化学反应所需的热量。图 2 显示用化石燃料生产的一种常用喷气发动机燃料（例如从石油提炼的喷气发动机燃料）和一种生物燃料（例如生物质转化成液体的喷气发动机燃料）的典型寿期。

理论上，用生物质生产的喷气发动机燃料在其整个寿期中二氧化碳排放量都较低。生物质作物生长时期吸收的二氧化碳大约等于生物燃料燃烧过程中释放到大气层的二氧化碳。生物燃料并非“碳中性”，因为生物质的生长、萃取、运输和加工需要使用设备，而设备运行则需要能源；但是，在理论上，生产和使用生物燃料而释放到大气层的二氧化碳总量显著低于从石油或其他化石燃料生产喷气发动机燃料而释放到大气层的二氧化碳总量。[28] 我们研究的替代燃料（从 CBTL 流程生产的燃料）不具有完全用生物质生产的替代燃料那样的碳中性属性，因为 CBTL 基燃料的一大部分是从煤生产的；但是，在理论上，CBTL 基燃料对环境的影响应该比 JP-8 航空油小，因为前者使用了一定比例的生物质原料。

本文分析的寿期阶段包括原材料萃取(采矿 / 农业)、原材料加工（提炼 /FT 工艺）以及作为喷气发动机燃料使用（在飞行中燃烧）(见图 1)。各阶段之间的材料运输及其对环境的影响通过经济互联关系纳入 EIO-LCA 评

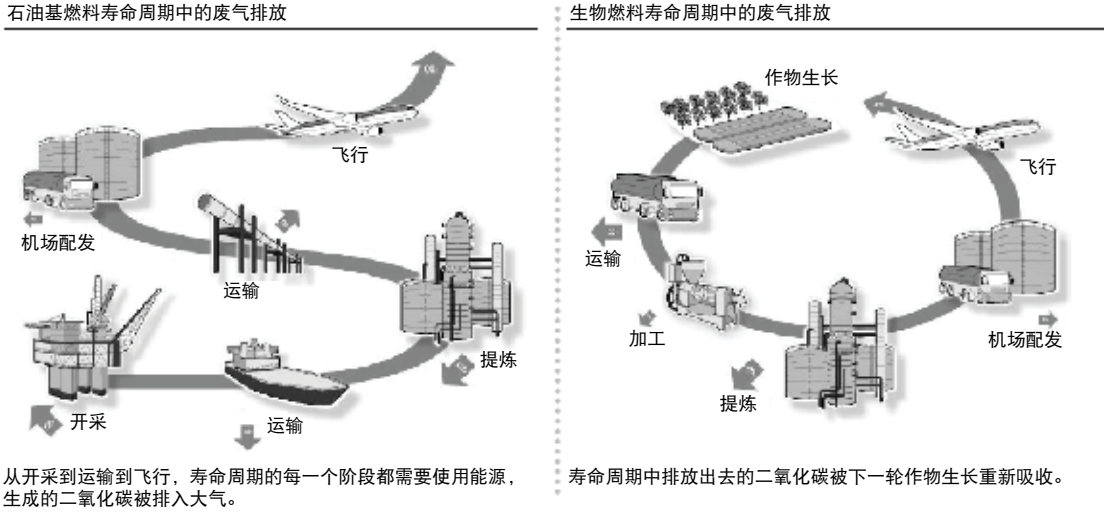

图 2：二氧化碳排放气体寿期（取自 Air Transport Action Group, Beginner’s Guide to Aviation Biofuels [航空生物燃料入门], [Geneva, Switzerland: Air Transport Action Group, May 2009], 3, http://www.enviro.aero/Content/Upload/File/BeginnersGuide_Biofuels_WebRes.pdf.）

估，并整合到每个阶段温室气体排放的全球增温潜势（GWP）总值。本文假设：在寿期评估的燃油使用阶段，JP-8 航空油和 CBTL 基燃料所排放的温室气体总量相同。根据能源信息管理局公布的资料，对于煤油基喷气发动机燃料，使用阶段排放的温室气体 GWP 总值通常是整个寿期排放的温室气体 GWP 总值的 84%。[29] 我们并假设不存在弃置阶段，因为飞机燃料燃尽后无任何剩余物需要弃置。

我们需要对混合分析模型做一些说明。我们使用的 EIO-LCA 数据库包含 2002 年的数据，这些数据未必反映 2011 年的经济现状。[30] 若干产业仍在使用与 2002 年相同的流程，但也有许多产业已经升级使用效率更高的工艺流程,从而改变了它们的环境足迹。例如，采煤行业基本上还在使用 2002 年的技术，而新型油电混合汽车的燃料使用效率已超过使用标准燃料的汽车。[31] 因此，这个数据库的准确性和完整性并不确定，因而使用 EIO-LCA 方法含有不确定因素。此外，2002 年尚无生产合成喷气发动机燃料的 FT 工艺流程，因此本文作者估算了用 FT 流程生产 CBTL 基燃料的成本，以计算其温室气体 GWP 值。尽管使用 EIO-LCA 比较 JP-8 和 CBTL 基燃料含有这些不确定因素，这个方法还是能够向决策者提供更绿色的喷气发动机燃料对环境影响的大致情况。

若要使用 EIO-LCA 评估模型，必须先确定接受评估的产品、流程或服务在特定寿期阶段所需的资源的成本。在这个方法中，EIO-LCA 工具对这两种燃料的原材料萃取阶段都适用。在材料加工阶段，EIO-LCA 评估模型仅适用于 JP-8 航空油，而不适用于 CBTL 基燃料，因为 FT 合成技术在美国不是一个行业标准流程。因此，美国没有一个合适的行业或部门能代表 EIO-LCA 评估模型中的这个阶段。最后，我们没有包括这两种燃料寿期评估的燃油使用阶段，因为我们假设它们在这一阶段的 GWP 总值是一样的。

JP-8 航空油的成本

典型柴油燃料的总成本包括四类成本。以 2010 年 10 月每加仑 2.80 美元零售价格为例，这四类成本分别是：17% 税金，12% 配送和营销成本，6% 提炼成本，以及 65% 原油成本。[32] 本文据此估算了 JP-8 的原材料萃取和加工相关成本：鉴于空军在 2008 年的喷气发动机燃料支出为 67 亿美元，我们估计原材料萃取（原油价值）和提炼成本分别约为 44 亿美元和 4.02 亿美元。[33] 我们是利用 EIO-LCA 数据库“油气萃取”和“石油提炼”部分的详细数据得出上述成本估算的。

CBTL 基燃料的成本

我们分析的 CBTL 基燃料含有 8% 生物质（重量百分比）和 92% 煤（重量百分比）。鉴于空军在 2008 年的喷气发动机燃料使用量为 24 亿加仑,若要达到空军的目标,即“空军国内航空油需求中替代混合燃料的使用比例达到 50%”（如上文所述），则需要有 6 亿加仑为替代燃料。[34] 因此，其中大约 5.5 亿加仑将来自煤，还有 0.5 亿加仑将来自柳枝稷。由于生产一桶（42 加仑）柴油需要半个短吨的煤，而生产一桶 CBTL 基燃料需要一个干吨的柳枝稷，因此生产 12 亿加仑喷气发动机混合燃料将需要大约 650 万短吨煤和 120 万干吨柳枝稷。[35] 按照 2010 年 1 月的售价，一短吨煤是 42 美元，一干吨柳枝稷是 53 美元，因而原材料萃取总成本分别是 2.73 亿美元和 0.64 亿美元。[36] 我们是利用 EIO-LCA 数据库“煤采掘”和“所有其他作物种植”部分的详细数据得出上述成本数值

的。如前所述，EIO-LCA 工具不适用于提炼流程;因此,我们从能源部获得环境影响数据。

为了确定每种燃料的环境影响，我们计算出每种燃料每一寿期阶段分析结果总和。根据 EIO-LCA 评估模型分析结果，CBTL 基燃料的 GWP 值比 JP-8 航空油低 14%，其中未考虑碳捕获。换言之，CBTL 基燃料的温室气体排放量比 JP-8 少 14%，因此更加绿色。但是，美国 2007 年能源独立安全法（EISA 2007）要求今后研发的喷气发动机替代燃料的寿期 GWP 值低于石油基喷气发动机燃料 GWP 值 20%。[37] 由于我们发现 CBTL 基燃料 GWP 值仅比基准值低 14%，在不考虑碳捕获封存的情况下，CBTL 基燃料没有达到能源独立安全法所定义的替代燃料的要求。

我们还进一步分析了生物质含量百分比从低到高的变化,以及包括碳捕获封存（CCS）和不包括 CCS 的区别。分析结果由图 3 显示，图中列出 CBTL 基燃料的不同生物质含量百分比，并比较此燃料相对于 JP-8 航空油的绿色程度。20% 位置的水平线代表能源独立安全法规定的政府标准。虚线显示 LCA 评估中未包括 CCS 的结果，实线则显示包括 CCS 的结果。该图表明，如果不考虑 CCS（这是较为保守的假设），生产 CBTL 基燃料时至少需要使用 8-10% 生物质。在任何情况下，如果考虑 CCS，则所有的 CBTL 基燃料都符合能源独立安全法标准。在生物质含量百分比较低时，采纳 CCS 处理工艺可明显改善 CBTL 基燃料与 JP-8 航空油相比较的绿色程度。

结语

替代燃料使国防部为其庞大的装备提供燃料时有更多选择。空军欢迎替代燃料，因为它们能使空军实现能源行动计划目标（提高国内来源燃料的比例）。但是，要确定一种燃料的绿色程度并非易事。空军决策者考虑的替代燃料必须在成本和可持续性方面与现有燃料不相上下；此外，替代燃料必须能大量生产，其寿期温室气体足迹必须低于石油基喷气发动机燃料（即替代燃料必须更加绿色），并且不会损害飞行安全性。[38] 采用替代燃料来源时会面临两个决策难题。第一，能源独立安全法等美国法律要求替代燃料的

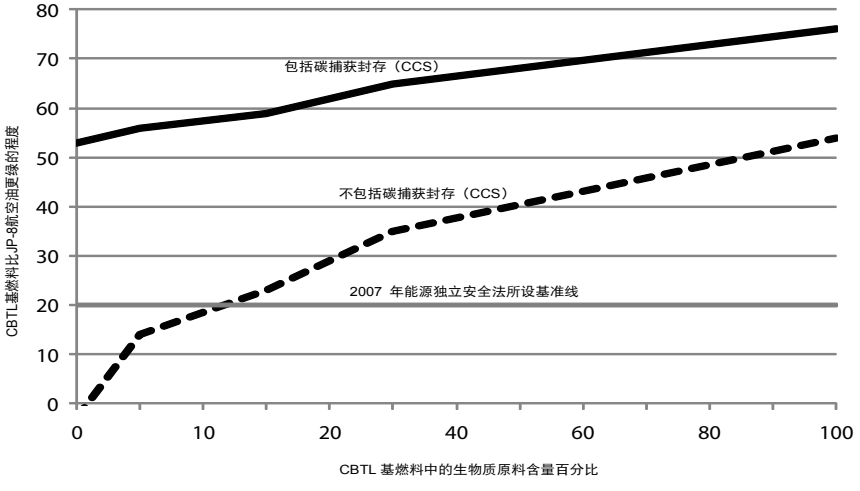

图 3：CBTL 基燃料中生物质原料含量越高，其相对于 JP-8 航空油的绿色程度就越高

GWP 总值必须低于基准值 20%。第二，决策者需要有一个评估燃料寿期环境影响的分析方法。

本文论述了这样一种分析方法，供空军领导人对替代燃料和石油基燃料进行比较、确定燃料的绿色程度时采用。如上述图 3 所示：所有 CBTL 基燃料的 GWP 总值，无论是否包括简单 CCS 工艺，都低于 JP-8 航空油，只有当替代燃料由百分之百煤转化且不包括 CCS 工艺时除外。因此，根据 EIO-LCA 分析，CBTL 流程可生产出整个寿期更加绿色的喷气发动机燃料。在此基础上，我们建议空军按照其能源战略的要求使用这些替代燃料。

空军和国防部领导人也许会认为，美国国内来源燃料具有战略重要性，因而不一定需要再做寿期评估。但是，起码空军应该支持科研界继续进行更多的现场研究，以加深理解替代燃料的使用对环境的影响。而且，空军应该关注航空燃料保障供应链中的其他环节（例如燃料储存），从而避免使用替代燃料可能造成的任何负面的、意外的后果。♣

注释:

1. Samuel King Jr.,“Air Force Officials Take Step toward Cleaner Fuel, Energy Independence”[空军采取措施获取更清洁燃料和实现能源独立], US Air Force, 25 March 2010, http://www.af.mil/news/story.asp?id=123196846.
2. Department of Defense Instruction 4170.11, Installation Energy Management [国防部 4170.11 指令：设施能源管理], 11 December 2009, 10, http://www.dtic.mil/whs/directives/corres/pdf/417011p.pdf.
3. Chris DiPetto,“Department of Defense Energy Security Task Force Update”[国防部能源安全工作组最新简报], slide presentation (Washington, DC: Pentagon, Office of the Secretary of Defense for Acquisition, Technology, and Logistics, 18 September 2008), slide 9, https://ldrd.llnl.gov/2008symp/DiPetto_symposium.pdf.
4. Michael A. Aimone,“Eliminating Energy Waste: The Role You Can (and Should) Play”[杜绝能源浪费：您能够（和应该）发挥的作用], (address, Society of American Engineers Conference, Salt Lake City, UT, 2009).
5. Air Force Policy Memorandum 10-1, Air Force Energy Program Policy Memorandum [空军政策备忘录 10-1：空军能源计划政策备忘录], 19 December 2008, 6.
6. 见注释 4。
7. “Diesel Fuel Explained: Diesel Fuel Outlook”[解说柴油燃料：柴油燃料展望], US Energy Information Administration, 2009, http://tonto.eia.doe.gov/energyexplained/index.cfm?page=environment_about_ghg.
8. “Oil: Crude and Petroleum Products Explained”[石油：解说原油和石油产品], US Energy Information Administration, 2009, http://tonto.eia.doe.gov/energyexplained/index.cfm?page=oil_home#tab1.
9. MIL-HDBK-510-1, Department of Defense Handbook: Aerospace Fuels Certification [国防部手册 MIL-HDBK-510-1：航空航天燃料认证], 13 November 2008, 10.
10. Tim Edwards, Biomass-Derived Aviation Fuels [生物质基航空燃料], internal document (Wright-Patterson AFB, OH: Air Force Research Laboratory, 2009), 2.
11. 同上，第 150 页。闪点是指某种可燃液体释放足够的蒸气以致可在空气中点燃的最低温度。典型的喷气发动机燃料的闪点高于 60°C，而乙醇的闪点则低于 20°C。燃烧热是指某特定质量的物质与氧气完全燃烧时释放的热量。喷气发动机燃料的燃烧热大于 40 兆焦耳 / 公斤（MJ/kg），而乙醇的燃烧热则低于 30 MJ/kg。
12. Timothy Searchinger et al.,“Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases through Emissions from Land-Use Change”[美国农田用于种植生物燃料作物而导致土地用途变更造成的温室气体排放增加], Science 319, no. 5867 (29 February 2008): 1238.
13. Bent Sørensen,“Carbon Calculations to Consider”[碳足迹计算考虑因素], Science 327, no. 5967 (12 February 2010): 780—81.
14. 见注释 12，第 1238 页。

15. University of Dayton Research Institute, Characterizing the Greenhouse Gas Footprints of Aviation Fuels from Fischer Tropsch Processing [介绍基于 FT 工艺流程的航空燃料的温室气体足迹] (Dayton, OH: University of Dayton Research Institute, prepared by the University of Texas at Austin, Center for Energy and Environmental Resources, 2010), 3.
16. 同上，第 28 页。
17. United Nations Environment Programme, Why Take a Life Cycle Approach? [为何应采用寿期评估方法 ?], 5th ed. (New York: St. Joseph Print Group, 2004), 5, http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx0585xPA-WhyLifeCycleEN.pdf.
18. Chris Hendrickson et al.,“Economic Input-Output Models for Environmental Life-Cycle Assessment”[环境寿期评估的经济投入产出模型], Environmental Science and Technology 32, no. 7 (1 April 1998): 185.
19. 同上，第 187 页。
20. “Approaches to Life Cycle Assessment”[寿期评估方法], Carnegie Mellon University, Green Design Institute, http://www.eiolca.net/Method/LCAapproaches.html.
21. 请访问 Carnegie Mellon University, Green Design Institute 网站：http://www.eiolca.net/Method/eio-lca-method.html.
22. 见注释 18，第 185 页。
23. Chris Hendrickson et al.,“Comparing Two Life Cycle Assessment Approaches: A Process Model vs. Economic Input-Output-Based Assessment”[比较两种寿期评估方法：流程模型和基于经济投入产出的评估], in Proceedings of the 1997 IEEE [Institute of Electrical and Electronics Engineers] International Symposium on Electronics and the Environment (San Francisco, CA: IEEE, May 1997), 177.
24. 见注释 20。
25. 见注释 20。
26. National Energy Technology Laboratory, Affordable, Low-Carbon Diesel Fuel from Domestic Coal and Biomass [用国产煤和生物质生产可负担的低碳柴油燃料], DOE/NETL-2009/1349 (Washington, DC: United States Department of Energy, 14 January 2009), vi, http://www.netl.doe.gov/energy-analyses/pubs/CBTL%20Final%20Report.pdf.
27. 见注释 15，第 34 页。
28. Air Transport Action Group, Beginner's Guide to Aviation Biofuels [航空生物燃料入门], (Geneva, Switzerland: Air Transport Action Group, May 2009), 2, accessed 1 March 2011, http://www.enviro.aero/Content/Upload/File/BeginnersGuide_Biofuels_WebRes.pdf.
29. 见注释 26，第 24 页。
30. 见注释 18，第 185 页。美国政府从 400 多个工业、制造业和服务业部门收集数据，并利用 EIO 表确定各个经济部门的相互关联状态。这个数据库为 EIO-LCA 评估模型提供了基本资料。
31. “Hybrid Vehicles”[油电混合车辆], US Department of Energy, http://www.fueleconomy.gov/feg/hybrid_sbs.shtml; 另参看“2004 Automotive Fuel Economy Program”[2004 年汽车燃料经济性计划], National Highway Traffic Safety Administration, http://www.nhtsa.gov/Laws+&+Regulations/CAFE++Fuel+Economy/2004+Automotive+Fuel+Economy+Program.
32. 参看“Coal News and Markets”[煤炭新闻和市场], US Energy Information Administration, 14 March 2011, http://www.howstuffworks.com/framed.htm?parent=gas-price.htm&url=http://tonto.eia.doe.gov/oog/info/gdu/gasdiesel.asp.
33. 空军使用了大约 24 亿加仑喷气发动机燃料。本文作者估计燃料成本大约为每加仑 2.80 美元。
34. 这 12 亿加仑是指混合燃油，由替代燃料和常规燃料各 50% 混合而成。
35. Nicholas Ducote and H. Sterling Burnett,“Turning Coal into Liquid Fuel”[煤转化成液体燃料], Brief Analysis no. 656 (Washington, DC: National Center for Policy Analysis, 1 May 2009), 1, http://www.ncpa.org/pdfs/ba656.pdf.
36. 参看“Coal News and Markets”[煤炭新闻和市场]. 用于生产喷气发动机燃料的煤应该每磅至少产生 11,000 英热单位的热量。另参看 Michael Popp and Robert Hogan Jr.,“Assessment of Two Alternative Switchgrass Harvest and Transport Methods”[对替代柳枝稷的两种作物及其运输方法的评估], (address, Farm Foundation Conference, St. Louis, MO, 12 April 2007), http://www.farmfoundation.org/news/articlefiles/364-Popp%20Switchgrass%20Modules%20SS%20no%20numbers.pdf.
37. US Public Law 110-140, Energy Independence and Security Act of 2007 [2007 年能源独立和安全法], sec. 202, 2007, 1522.
38. 见注释 10，第 15 页。