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。

空军转用生物燃油的潜在问题及意外后果

Unintended Consequences: Potential Downsides of the Air Force's Conversion to Biofuels

马克·N·戈尔齐，美国空军退役中校 / 博士（Lt Col Mark N. Goltz, PhD, USAF, Retired）
查尔斯·A·布莱克曼博士（Dr. Charles A. Bleckmann）
道格拉斯·M·麦凯博士（Dr. Douglas M. Mackay）
王洪恺，美国空军少校（Maj Khai Vuong, USAF）
杰鲁德·P·麦库姆，美国空军上尉（Capt Jerrod P. McComb, USAF）*

当今美国面对着依赖国外能源、环境忧患加深和石油价格不断上升等问题，希望有所突破，由此引发各种"更绿"的替代和再生能源的科研热潮，其中之一是开发基于酒精的生物燃油。美国国防部也采取对策，努力减少飞机和地面装备对石油燃料的依赖。美国空军与国防部目标呼应，制定了数项节能目标：(1) 减少运载工具使用石油燃料的比例，每年降低 2%；(2) 增加汽车使用替代燃料的比例，每年提高 10%；(3) 在 2011 年完成对所有飞机和武器系统使用 50/50 替代混合燃料的认证；(4) 在 2016 年实现空军飞机使用替代混合燃料达 50% 的目标。[1] 这份雄心勃勃的时间表将推动全球最大的石油用户——美国国防部——大步迈入替代能源市场。身为世界胃口最大的燃料消费者，国防部此举很可能驱动全球航空和汽车燃油市场转型，从供应传统燃料转为支持新兴市场，满足消费者对新型替代燃料的需求。虽然转用替代燃料能明显降低二氧化碳排放量，但这种燃料的外泄对土壤和地表水的污染风险一直不明，直到最近才开始显露。

本文认为，我们尚未充分研究替代燃料对环境的潜在影响。目前的研究成果表明，在大规模使用替代燃料后，其对地表下环境的污染风险实际上可能升高。进一步，由于替代燃料的生物反应特性更强，未来的燃油配发和储运系统可能面对微生物滋生腐坏问题而束手无策。从谨慎的角度出发，空军应使用最新的研究结果，积极支持新科研项目，努力理解加速转用生物燃油的后果，包括燃油外泄对环境的影响和其他风险，以及运输、储存及消耗系统使用这类燃油后的受损情况。本文立足这些考虑，提出一些前瞻建议，旨在确保当替代燃料滚滚流入国防部巨大的油管系统之后，国防部的数千燃料配发和储运场不会发生污染地表水或生成爆炸气体等意外事故，也不会出现燃油因微生物繁殖变质而影响作战行动的情况。

对地表下环境的影响

在整个国防部，数百万加仑燃油从巨大的地面和地下储油罐安全流入和流出，构成我们的燃油体系。燃油储运和配发领域的技术百年来不断发展，但系统性的泄漏和溢洒仍时有所闻。数千英里管道中的每一个接头、每一道阀门、储罐中的每一条焊缝，都构成潜在的泄漏源。这些燃油从储罐、管道、油罐车及相关设备中不时外泄，污染了土壤和地表水，生成一类对环境有害的化合物，称

* 戈尔齐博士和布莱克曼博士在美国空军理工学院任教，参与环境工程科学项目研究。麦凯博士来自加州大学戴维斯分校陆地/天空/水资源系，就污染物质在地表下的归宿开展过许多现场调研，包括最近对乙醇之影响的现场研究。王洪恺少校从空军理工学院获得硕士学位，目前在也位于赖特—帕特森空军基地的空军航空医学院担任顾问。麦库姆上尉亦从空军理工学院获得硕士学位，现在位于华盛顿州费尔柴尔德空军基地的第 92 工兵中队担任作战保障主管。

为芳香烃。在这类化合物中，以苯为代表的数种物质是已知的致癌物。[2] 在土壤和地表水中，芳香烃，如苯和其他溶解及气化污染物质的含量，通常经自然过程而降低，天然存在的地下（即地表下）细菌可把碳氢化合污染物质，如苯、甲苯、乙苯、二甲苯异构体（四类物质统称为 BTEX）以及它们分解后的物质如甲烷等，转化为无害物质。有些细菌以这些有机污染物质——有时与一种氧化介质如氧气相结合——作为碳源和能源(亦即它们为生存和成长所需的关键“食物”)。

如本文以下的现场数据分析所示，将替代燃料引入一种不时发生泄漏的燃油混合体中，会严重改变细菌、BTEX 和其他污染物质，以及氧化介质之间的复杂生态关系，从而加大对地表水污染的风险。以往研究中用计算机建模技术研究这类污染，因为乙醇被广泛视为最理想的发动机替代燃料，故而重点放在细菌在有乙醇的环境中消化 BTEX 的能力。但这些模型实验通常假设有氧化介质(氧气）存在，而事实上这类介质通常并不大量存在于漏油现场周围的土壤和地表水中，因此研究结果高估了替代燃料对环境的无害性。[3] 近期研究则揭示出更令人不安的后果。

研究人员在加州范登堡空军基地开展了现场实验，他们将汽油与乙醇混合，缓慢渗入地表水，相当于一个乙醇 / 汽油混合油罐发生难以察觉的泄漏，然后观察其所造成的地下污染，结果令人震惊。[4] 这项现场研究是为探究 BTEX 在含有或不含有乙醇的状态下的归宿。研究人员在范登堡的地下蓄水层同步展开了两项实验，用硫酸盐作为主要的氧化介质，这也是国内许多石油现场处理泄漏的惯常做法。[5] 第一项实验是连续九个月注入含有少量（每升中含 1-3 毫克 [mg/L]）BTEX 类的化合物质、即苯、甲苯和邻二甲苯异构体的污染水。同时进行的第二项实验取其相邻地点，注入含 BTEX 化合物的 500 mg/L 乙醇。研究人员持续观察 BTEX 污染物质、尤其是致癌物质苯的含量变化，同时关注氧化介质（特别是氧气和硫酸盐)、降解产品（包括甲烷)，以及在第二项实验中乙醇的含量变化。第一项实验获得结果如预期，污染雾流在地下逐步散发，约四个月后苯污染几乎完全消散，因为自然繁殖的细菌在其中发挥了生物降解作用。

第二项实验的结果与之对比差异巨大。在加入乙醇和苯污染物质的第二个实验点，污染区域和第一项实验一样，出现扩散。不同的是，苯污染没有像第一项实验那样衰减。第二项实验中，苯的降解更加缓慢，并且，由于本土细菌的活动大量转移向更易于降解的乙醇，故而产生丰富的甲烷。那些以常见硫酸盐氧化介质为生存物质的细菌，以及那些不需要氧化介质就能降解污染物质（其中有些生成甲烷）的微生物，都符合这种现象描述。此结果进一步使研究人员认定：原先的计算机模型假设不完全符合所有环境。而现场实验的结果为研究人员提供了更有用的信息，使他们更深刻地理解了自然过程在存在有普遍认可的替代燃料即乙醇的环境中去除 BTEX 毒性的能力。现场实验也证明，乙醇可能降解而生成大量甲烷。在实际泄漏中如果燃油大量溢洒，导致超过实验数量的乙醇渗入地表，污染区可能生成大量甲烷，这种可燃气体将在土壤中大量扩散。如果这种甲烷不能被本土微生物所氧化掉，在一定形势下，生物燃油的泄漏就可能演变为可爆气体混合物，弥漫在建筑物的地下室和地下设施中，或者地表面上。

把乙醇加入到石油燃料中看来会减缓有害的 BTEX 化合物质的降解速度。并且，和

原先计算机模型的结果相比，有害物质将存留更长时间，散发更远距离。简言之，这项实验结果确凿无误，因为它是在典型的燃油泄漏现场进行，获得了明确和详细的证据支持。我们现在可以运用更加可信的计算机模型，根据现场实验结果来推断实验现场以外其他环境的演变。空军理工学院研究人员已经在范登堡基地重要实验结果的基础上建立起这样的计算机模型。我们在此模型中模拟向燃油中加入乙醇后的长期影响，以 30 年为期，做了两项模拟，其一仅以苯为对象，其二以苯 / 乙醇混合物为对象。模型结果再次确认了现场实验获得的数据：即在 30 年模拟期中，含乙醇的苯雾流远远比不含乙醇的苯雾流存留得更长。

丁醇也是一种酒精，也可作为生物燃油添加到燃油中，它和乙醇相比有多方面的优势。在能量密度上丁醇接近汽油，乙醇则比汽油低 34%。[6] 在挥发性和腐蚀性上，丁醇都比乙醇低，对水的亲和性也更低，并且与当前使用的管道和储油设施兼容。[7] 丁醇和汽油充分相近，故而可以“直接加入任何汽油发动机而不必对发动机做改造或替换。”[8] 基于这个事实，并且考虑到先前在范登堡基地的现场研究所揭示的乙醇对地表水的影响，空军理工学院研究人员进一步建立模型，模拟取丁醇为生物燃油后可能发生的现象。可是，在输入了过去实验室和建模研究中认为合理的那些假设数据之后，这项模型反而生成了更负面的预测结果，即丁醇比乙醇对苯的归宿有更大的负面作用，而苯是汽油中危害最大的化合物。[9] 研究人员由此感到需要输入更多的假设才能把这项模拟做好，鉴于这项课题事关重大，我们认为有必要运用真实地质介质开展现场研究，获得发现，然后确定或修改建模的假设数据，对含丁醇燃油对环境的影响做出更有说服力的预测。

微生物滋生腐坏风险

提高生物燃油使用比例后，除了对地表下环境发生影响之外，还可能引发另一个看似有趣实则极为重大的问题，这就是微生物滋生导致燃油变质。生物燃油和石油燃油在燃烧特性方面非常相近，但是两者的化学组成非常不同。[10] 生物燃油（例如生物柴油）中包含一些物质，它们更易溶于水，更易被微生物降解。燃油管道、储油罐及油罐车等设施的运行维护人员目前都十分注意防水，原因就在于水 / 油界面区可能滋生微生物。但是我们不可能完全将水隔离于系统之外，比如简易通气孔可导入湿空气，凝结后就可能作为液态水进入燃油储运系统中。目前存在的燃油变质和微生物滋生问题虽然程度有限，却一直挥之不去，有时十分棘手，令储运人员难以对付。事实上，大概任何燃油储运系统都无法彻底解决微生物滋生和燃油变质问题。

通用的检验手段可能探察不出燃油中的微生物。空军理工学院多年来致力开展实验室和现场研究，查验燃油中的微生物现象。空军理工学院和空军研究实验室人员通过从航空燃油储罐取样，证明燃油中含有各种微生物但无一居首，不同地理区域或不同类型航空燃油中存在着不同的微生物组合，重复现象很低。[11] 许多细菌和真菌都能使燃油成份新陈代谢，导致燃油质量严重下降，如果因此发生腐坏或腐蚀，则可能破坏整个燃油储运系统。此事实表明，燃油变质有其复杂原因，但如果通过科研找到最常见的微生物祸首，将有助于找到预防燃油品质受损的途径。

生物燃油的溶水性和降解性更强，传统燃油中存在的微生物滋生腐坏问题随着生物燃油加大使用将成倍增长，目前面对的这些讨厌顽疾可能演变成重大问题。储油罐和油罐车等设施中微生物滋生腐坏可能蔓延而成为代价昂贵的不治之患，飞机燃油系统如腐坏可能导致悲剧事故。在上世纪五十年代后期，至少有一起飞机坠毁事故判定为微生物腐坏燃油系统所致。[12] 幸运的是，在此事故之后，人们发现一种除冰剂能有效抑制微生物，故而添加到燃油中，多年来防止了这类事故重演。现在因关注燃油毒性，燃油组成（JP-4 号变成 JP-8 号航空油）和除冰剂都已改变，这有可能导致微生物污染卷土重来。提高生物燃油使用比例可能更加强化微生物污染和燃油变质的风险。显然，我们需要找出那些对新型燃油构成最大危险的微生物品种，由此防患于未然。进一步，我们应通过研究判定新型燃油变质对不同储运系统的影响，从中找到降低此风险的最佳方案。例如，高流量系统中因燃油保持快速流动而不易滋生微生物，因此系统保洁相对容易。但在那些长期静止的储油罐中，例如为紧急备用发电系统配置的储油罐中，微生物污染和变质可能引发严重挑战。

至少，在使用生物燃油过程中，维护人员必须开展广泛监视，执行更严格的保洁标准。对生物燃油造成严重事故的预防，将远远超过对石油燃料所做的努力，将要求我们开展更多研究，加深了解，用科学知识来加强预防努力。

建议

最新的研究清楚表明：替代燃料对土壤和地表水构成潜在威胁，生物燃油的泄漏可能导致产生大量甲烷气体，并可能延长以苯为代表的燃油致癌成份在水源中的留存期。另外，在使用替代生物燃油的环境中，由于苯和其他污染物质在漏油区域中的降解过程减缓，污染雾流在细菌将之消化到可接受的程度之前，就可能扩散到更大范围。还有，由于生物燃油的吸湿性和生物降解性比石油燃料更强，使用者以及储运系统人员在执行任务中可能必须做出更大努力来应对微生物腐坏带来的降解变质问题。[13] 笔者理解军方转向使用生物燃油的迫切性，但建议在同时也关注由此带来的研究上的同等迫切性，以通过科研获得所需知识，调整我军的燃油管理做法和安全规程，从而保持高标准维护燃油储运设施、设备、人员和环境。笔者因此提出如下建议，旨在减少生物燃油对土壤和地表水的污染，及燃油储运系统的微生物滋生腐坏风险。

1. 开发新技术以降低、监视和减少生物燃油泄漏和溢洒，这些技术应针对生物燃油的配发和储运而设计。这个过程还要包括对各加工、配发、储运和使用设施中的关键固定件和连接件进行升级改造，确保最可能发生泄漏的部位都得到改进，符合使用新型混合燃油的密封需要。

2. 扩大研究范围，在生物燃油对环境的影响和微生物滋生腐坏等方面加深认识。

结语

美国空军响应国防部的减能目标，积极开展科研并研发能兼容生物燃油的军事装备，鉴于生物燃油有其明显优点，此项努力是为必要。但是我们尚未充分了解生物燃油的各种缺点。研究人员通过在范登堡空军基地现场实验后，才意识到原先计算机模型中使用的假设数据可能有误，由此揭示出生物燃油

对环境的潜在污染风险。这项研究清楚表明：以苯为代表的致癌物质污染雾流，在含乙醇情况下可能长期存留并扩散，在不含乙醇情况下则如预期消解。[14] 另外，现场实验和在空军理工学院的科研活动，为理解石油基燃油中微生物滋生腐坏现象提供了关键的发现，预示在转用生物燃油之后，这种现象将更加严重。由于国防部没有为这方面的关键研究提供更多支持，空军部应提供资金，使此项研究得以继续。

在未来，军方高层领导班子将在为地面和空中平台选择生物燃油类型及其混合比例等方面面对一系列决策难题。空军目前开展的研究有助于在某些领域，例如替代燃料与终端用户系统、引擎、涡轮发动机等的兼容性，支持领导做出决策。但是在其他一些重大问题上，如“非显性”环境污染和微生物滋生腐坏等，研究人员还未获得充分认知。因此至少，空军部应该支持进一步的现场实验，以加深对生物燃油对地表下环境潜在破坏的理解，并相应研制出监视泄漏和补救的新方法。空军还应该继续钻研微生物导致生物燃油变质的机理和预防途径。如果国防部和空军部必须在取得更多研究成果之前就部署采用生物燃油，我们建议对某些储存和使用生物燃油的地点进行远远超过正常规程的严密监控，也许可以设立一个“应用研究”项目，以澄清和界定本文提出的一些重大问题。只有通过良好控制的实验室和现场调研及应用研究，国防部和空军部才能把握这些问题的实质，开发出新技术，支持高层领导人做出知情决策，避免发生难堪意外。♣

注释:

1. Air Force Policy Memorandum 10-1.1, Air Force Energy Program Policy Memorandum [空军能源计划政策备忘录], 16 June 2009, 6—7, http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA502661.
2. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2003 TLVs and BEIs: Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices [化学物质和物理介质阈值及生物暴露指数], (Cincinnati: ACGIH, 2003), 15.
3. Diego E. Gomez and Pedro J. J. Alvarez, “Modeling the Natural Attenuation of Benzene in Groundwater Impacted by Ethanol-Blended Fuels: Effect of Ethanol Content on the Lifespan and Maximum Length of Benzene Plumes”[建立乙醇混合燃油对苯在地表水中自然衰减的作用模型：乙醇含量对苯雾生命周期和最大留存期的影响], Water Resources Research 45 (2009): W03409, doi:10.1029/2008WR007159.
4. Douglas M. Mackay et al., “Impact of Ethanol on the Natural Attenuation of Benzene, Toluene, and O-xylene in a Normally Sulfate-Reducing Aquifer”[乙醇对苯、甲苯和二甲苯在常规硫酸盐减弱蓄水层中自然衰减的影响], Environmental Science and Technology 40, no. 19 (2006): 6123—30.
5. Todd H. Wiedemeier et al., Natural Attenuation of Fuels and Chlorinated Solvents in the Subsurface [燃油和加氯溶剂在地表下的自然衰减], (New York: John Wiley and Sons, 1999), 213—18.
6. 密度指每单位体积之能量。
7. Lawrence P. Wackett, “Microbial-Based Motor Fuels: Science and Technology”[基于微生物的发动机燃油：科学和技术], Microbial Biotechnology 1, no. 3 (2008): 211—25; 另参看 Adriano P. Mariano et al., “Aerobic Biodegradation of Butanol and Gasoline Blends”[需氧菌对丁醇 / 汽油混合油的生物降解作用], Biomass and Bioenergy 33, no. 9 (September 2009): 1175—81.
8. Sang Yup Lee et al., “Fermentative Butanol Production by Clostridia”[用芽孢梭菌类细菌生成发酵丁醇], Biotechnology and Bioengineering 101, no. 2 (2008): 210.

9. Capt Khai H. Vuong, “Modeling the Fate of Groundwater Contaminants Resulting from Leakage of Butanol-Blended Fuel”[建模预测丁醇混合燃油泄漏后其污染物质在地表水中的归宿], AFIT/GES/ENV/10-M06 (thesis, Department of Systems and Engineering Management, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, OH, March 2010), https://www.afresearch.org/skins/rims/q_mod_be0e99f3-fc56-4ccb-8dfe-670c0822a153/q_act_downloadpaper/q_obj_2262ab9b-e4ad-49da-ba4a-43c31778618f/display.aspx?rs=publishedsearch.

10. Jared A. DeMello et al., “Biodegradation and Environmental Behavior of Biodiesel Mixtures in the Sea: An Initial Study”[生物柴油混合油在海水中的生物降解和环境行为初探], Marine Pollution Bulletin 54, no. 7 (2007): 894—904.

11. Michelle E. Rauch et al., “Characterization of Microbial Contamination in United States Air Force Aviation Fuel Tanks”[美国空军航空油储罐中的微生物污染特征], Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology 33, no. 1 (2006): 29—36; 另参看 Lisa M. Brown et al., “Community Dynamics and Phylogenetics of Bacteria Fouling Jet A and JP-8 Aviation Fuel”[细菌腐坏 Jet A 和 JP 8 号航空油的群体动态及生物种族机理], International Biodeterioration and Biodegradation 64, no. 3 (June 2010): 253—61.

12. Viola H. Finefrock and Sheldon A. London, Microbial Contamination of USAF JP-4 Fuels [美国空军 JP-4 号航空油中的微生物污染], Technical Report AFAPL-TR-66-91 (Wright-Patterson AFB, OH: Air Force Aero Propulsion Laboratory, 1966), 1, http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=AD809366&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf.

13.“吸湿性”一词的英文是“Hygroscopic”，表示对环境水份的收湿或吸湿能力。

14. 见注释 4，第 6123—30 页。

The military relationship between the United States and China is one of the world’s most important. And yet, clouded by some misunderstanding and suspicion, it remains among the most challenging. There are issues on which we disagree and are tempted to confront each other. But there are crucial areas where our interests coincide, on which we must work together.

——Mike Mullen, Joint Chiefs of Staff, www.nytimes.com/2011/07/26/opinion/26Mullen.html

美国和中国之间的军事关系是世界上最重要的关系之一。但是由于一些误解和猜忌的存在，这种关系依然属于那类面临严峻挑战的关系。我们之间在有些问题上存在分歧，故而可能发生相互对抗。但是，我们在一些关键的领域存在共同的利益，又必须进行合作。

——美国参谋长联席会议主席迈克・马伦海军上将，《纽约时报》2011 年 7 月 25 日