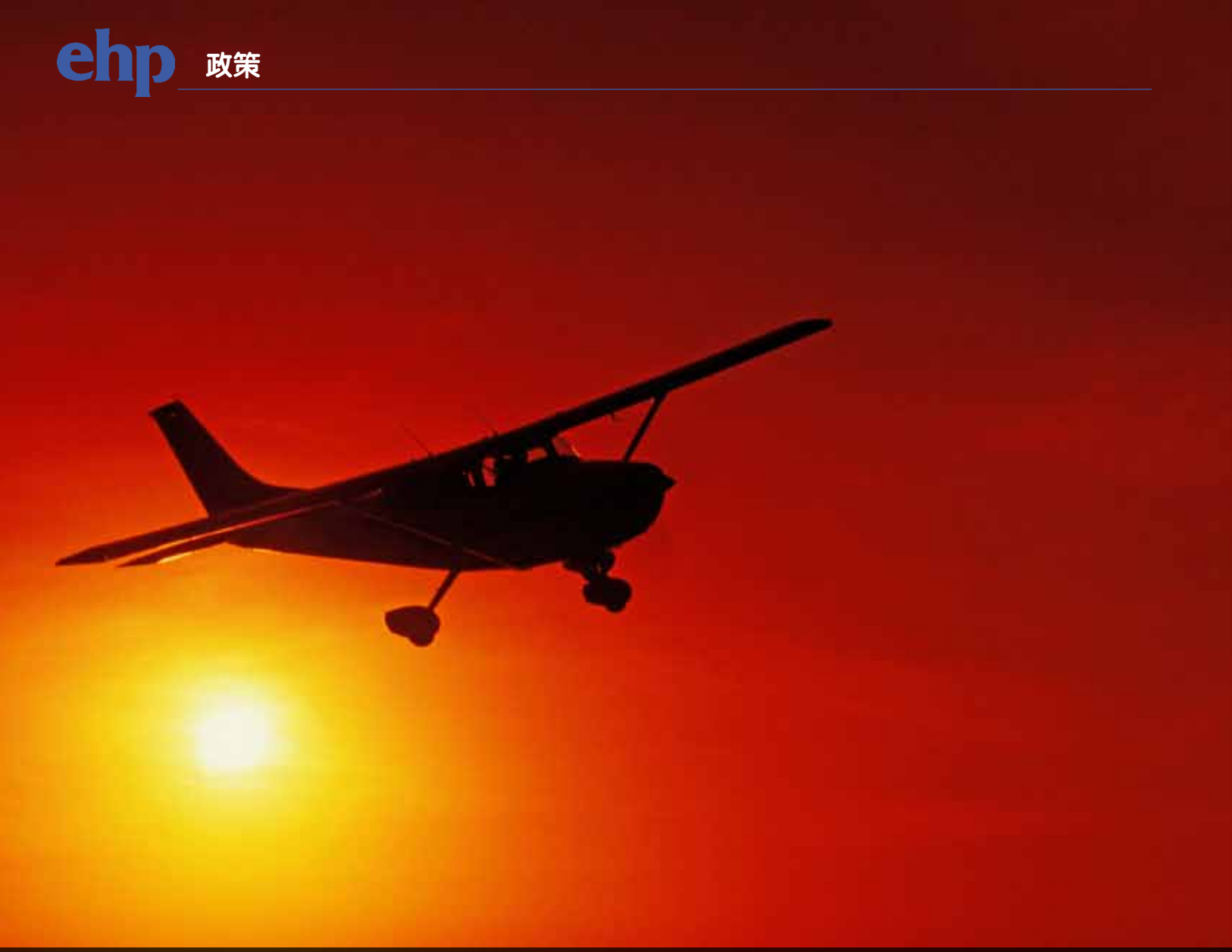

含铅航空汽油命数将尽？

乘坐活塞发动机式小型飞机与乘坐商业飞机相比完全不可同日而语。前者无专门的飞机跑道，无行李检查，在机舱内甚至连伸腿的空间都很有限。当小型飞机在柏油跑道上开动时，乘机人可以清晰地感受到机身的每一次跳动以及发动机的每一次震动。飞机升空后乘机人将不得不适应其简陋的条件，不过较低的飞行高度让乘机人可以清楚地观赏机外飞逝而过的地面景观。这种经历更像是乘坐在一辆会飞的汽车里，而非身处大气客机密闭的机舱内。对于像笔者这样的乘客而言，这样的旅行乐趣多多。

此外还有一种不太明显的差别，与商业客机使用航空煤油为燃料不同，大多数活塞发动机式飞行设备仍然使用含铅的航空汽油。事实上，航空汽油是美国少数几种仍然含铅的燃料之一。根据美国环境保护署（EPA）的报告，这导致航空汽油成为美国最大的铅排放源。对铅的健康效应的担忧已促使人们考虑将铅从航空汽油中清除出去—航空制造业和石油工业为此努力了二十余年，却仍然收效甚微。

降低暴露的进展

有充分证据表明铅是一种神经毒性物质，尤其对儿童的危害较大。当儿童在家中食入或吸入含铅的尘土时，会导致他们暴露于该种物质。近年来的研究发现，儿童血液中铅浓度即使远低于之前认可的危害值，也可能导致严重的认知和行为功能（包括智力、注意力和运动技能）损害。目前认为铅暴露没有安全水平阈值。美国疾病预防控制中心（CDC）在2012年春季制定了血铅“参考值”（5 μg/dL），仅是干预措施建议值的一半。据估计，有45万美国儿童的血铅水平高于该参考值。

Previous page: © RGB Ventures LLC dba SuperStock/Alamy

相关部门已采取大量措施降低铅暴露。目前美国儿童的平均血铅水平是1.2 μg/dL，远低于1976~1980年间的15 μg/dL。这种显著降低与铅排放的减少密切相关。铅于1978年被禁止用于家用油漆涂料，于1986年被禁止用于管道制造，于1995年被禁止用于罐头食品的焊接材料中。到1996年时，含铅汽油已被逐步淘汰，从而使大气铅排放较1978年降低了98%。对金属处理设施的严格控制使铅排放得到进一步降低。

与机动车用汽油不同，航空汽油中的铅没有得到控制。为保证飞行安全，航空汽油中会加入四乙基铅（tetraethyl lead），增加辛烷值以防止“爆震”或者意外的燃料爆炸可能导致飞机发动机损坏。许多飞机发动机在设计时要求以尽可能少的重量产生巨大的能量，而这要依靠使用高辛烷值的燃料才能实现。目前使用的大多数含铅航空汽油是辛烷值为100的低铅汽油或称为100LL，与辛烷值为105的机动车用汽油相当（加油站销售的汽油辛烷值在87至93之间）。这种航空汽油含有的四乙基铅最高值为2.0克/加仑，比二战后数十年间通用的115辛烷值的航空燃料中的铅含量低一半以上。

“铅如同预防爆炸的魔力万能药。确实没有任何其他的化学物质能够具有像铅一样的阻止爆炸功效。”联邦航空事务局（Federal Aviation Administration，FAA）新能源项目办公室（Fuels Program Office）主任Peter White如是说。该办公室于2012年秋季成立，旨在寻找100LL的无铅替代品。

全美有近两万座机场，其中大部分规模都较小，主要用于起降私人或企业拥有的小型飞机，执行非商业性的所谓“民间通用航空”飞行任务，包括学校交通、旅游观光等。通用航空飞行器包括在数十年间制造的多种形式各异的飞行设备，如飞机和试验性质的飞行器等。

71%的飞行设备，包括大约159000架飞行器，装载活塞发动机并使用航空汽油。根据美国能源信息局（Energy Information Administration）的数据，上述飞行器在2011年使用的航空汽油总量为2.25亿加仑。这些数据近年呈下跌趋势。1981年大约有20万架活塞发动机式的飞行器，使用的航空汽油数量为如今的2倍。即便如此，目前的活塞发动机式飞行器仍然是美国铅排放的首要来源。根据国家排放目录（National Emissions Inventory）统计，2008年铅总排放量（964吨）中的57%来源于上述飞行器。

来源于机场的铅排放

有监测研究发现，北美5座机场上方及周围空气中的铅超过背景值。然而只有其中一座机场—加州圣莫尼卡市机场（Santa Monica municipal airport）—采用了合适的监测方法，其监测结果可与2008年国家大气质量标准（2008 National Ambient Air Quality Standards，NAAQS）中的铅标准限值进行比较。超过标准的场所必需遵守排放控制措施。在圣莫尼卡，大气铅季度最高平均值为0.10 μg/m^3，为标准限值0.15 μg/m^{3}的三分之二。这个结果不仅使EPA认识到机场有可能导致大气铅水平高于标准限值，也促使其开始考虑是否应在现有基础上进一步降低标准值。

根据EPA的数据，将近一半的铅排放源于活塞发动机式飞行器在机场周围的盘旋飞行，而其余则在飞行过程中广为扩散。由国家海洋和大气局的研究者在2008年进行一项全国性研究显示，与其他气溶胶不同，大气含铅颗粒物在周末达到峰值，这可能与休闲娱乐性质的飞行活动有关。来源于航空汽油的铅有可能污染水体并进入鱼的机体组织，而低空飞行的活塞发动机式飞行器则可能导致铅直接进入农作物和牲畜体内。

EPA认为经常执行通用航空飞行任务的飞行员和经常乘飞机的人暴露于航空汽油中铅的风险最大。但是普通公众也可能受到影响。EPA在2010年估计，排放铅的机场周围1公里内居住着1600万人，并有300万学龄儿童在上学。上述人群中相当一部分是低收入和少数族裔居民，他们本身已经面临较高的铅暴露风险。然而，居住在富人区也不意味着安全。例如，毗邻圣莫尼卡市机场的一处社区，其一套三居室住宅的价格通常在100万美元以上。

杜克大学的研究者在2011年发表了一项研究结果，首次评价了儿童血铅水平与居住地点同机场距离远近的关系。该研究在北卡罗莱纳的6个县进行，发现居住在机场周围500米内的儿童平均血铅水平较居住在2000米之外的儿童高4.4%。居住在机场周围500～1000米内的儿童铅暴露水平开始降低，而居住在更远处的儿童其暴露水平与背景值持平。

现任密歇根大学自然资源与环境学院院长，该研究的负责人Marie Lynn Miranda认为，虽然上述差异不大，但平均暴露水平的增加足以导致该研究中的部分儿童血铅水平高于CDC的参考值（5 μg/dL）。该研究并未将机场明确归结为导致铅水平增高的来源，但Miranda认为，即使存在显著的排放源（如变质退化的含铅涂料、进口产品和饮用水相关来源），降低任何小型源的铅排放仍然是非常重要的。“虽然航空汽油中的铅并不在儿童铅暴露的三大主要来源中，它仍旧是这种广为人知的神经毒性物质的来源之一。” Miranda说，“我们研究铅越多，越能理解即使非常低水平的暴露也能导致不良效应。”

哈佛医学院一位研究神经毒性物质如何影响脑发育的神经学教授David Bellinger认为，该研究中可能归因于航空汽油的血铅增加在某些亚组的儿童中可能远高于平均值。在肯定该研究的同时，Bellinger希望能够看到更深入的研究，以阐明诸如飞行轨道、风向之类的因素如何影响暴露模式（Miranda正在计划进行这一相关的研究）。

Bellinger指出，虽然如此低水平的铅暴露可能不会对任何儿童产生明显的影响—因为定量IQ值的少量降低十分困难—但是这些效应综合起来可能对整体人群产生影响。他在2012年4月发表了

一项研究，计算出美国0～5岁儿童归因于多种化学物质暴露和医疗状况的累积IQ降低值。铅暴露总共导致了全国0～5岁儿童近2300万个IQ值的损失，只有早产导致的损失高于此值。“这项研究具有一些社会影响，”Bellinger说，“阻断那些可以阻断的暴露途径是明智的。如果我们知道如何预防来自某种途径的暴露，并据此采取措施，将会产生良好的效益。”

将铅清除出去

自2003年以来，一直有人呼吁针对航空汽油中的铅采取措施。当时一个名为“蓝水网络”（Bluewater Network）的非政府组织致信EPA，阐述航空汽油可能置公众健康和福祉于危险境地，该组织后与另一个环境组织“地球之友”（Friends of the Earth，FoE）合并。2006年“地球之友”向EPA请愿，希望EPA发布一份官方“危害发现”，说明航空汽油中的铅的确危害公众健康，需要依据清洁空气法案（Clean Air Act）进行管制，或进行必要的研究以证明上述做法的合理性。2010年4月EPA发布了一项调控措施制定的预先通告，描述了现有的数据及研究计划，同时也征求对该议题的意见及进一步的信息，但并未采取进一步的行动。

2012年3月“地球之友”对EPA提起诉讼，要求对方决定是否发布“危害发现”。EPA4 个月后对此予以回应，称正在进行相关的检测和建模研究，以阐明全国机场铅排放的影响及其在空气质量未达NAAQS标准的地区起了多大作用。预计将于2015年底发布相关研究结果及政策决定。

“地球之友”主管Marcie Keever说：“我们认为目前已有足够的证据表明含铅航空汽油是有害的，对我们以及许多居住在这些机场围栏线周围的居民而言逐步将航空汽油中的铅清除掉的愿望似乎已有共识。”EPA的发言人未能安排该机构的科学家或者政策人员就此发表评论。

与此同时，2011年另一个称为“环境健康中心”（Center for Environmental Health，CEH）的环境组织，依据加州唯一的安全饮用水和毒物实施法案（Safe Drinking Water and Toxic Enforcement Act，又称第65号提案），起诉了几个航空汽油制造商和供应商，称他们未能对25座机场周围的居民就铅排放发出警示。为回应“环境健康中心”的指控，一组航空汽油供应商也提起了一项诉讼，声称用第65号提案来拿航空汽油说事不符合联邦法律规定。如果“环境健康中心”的诉讼获胜，将有效地阻止航空汽油在美国国内的销售并导致通用航空的37000架飞机无法使用。联邦法庭驳回了供应商的起诉，但“环境健康中心”的65号提案诉讼仍在处理中。

飞行器业主和飞行员协会（Aircraft Owners and Pilots Association，AOPA）监管事务副主任Rob Hackman认为，法律诉讼、被管制可能性、航空汽油价格的上升、使用含铅燃料的活塞发动机式飞行设备的利用率下降，以及未来四乙基铅供应（四乙基铅只有一家生产商）等问题，航空工业界相信已到了给100LL寻找合适替代品的时候了。飞行器业主和飞行员协会与国家航空运输协会（National Air Transportation Association，NATA）以及其他航空和石油贸易组织共同组成了通用航空汽油联盟（General Aviation Avgas Coalition）。尽管该联盟声称将致力于实现“一个无铅的未来”，却在2010年向EPA提交了一份评论，认为目前没有充分证据证明含铅航空汽油有害。

根据Hackman的说法，通用航空工业已意识到开发新型燃料的必要性，并开展了大量研究。事实上，他们与石油工业一道，为清除航空汽油中的铅已经努力了20余年。在其中大部分时间里，他们坚持要开发“银弹替代品（silver-bullet replacement）”燃料。即一种适用于大多数航空汽油飞行器，并与现有燃料供应网络完全兼容的替代品。但是这个想法被证明是不可行的。

以往已经对数十种混合物进行了完整的发动机测试，但是没有一种物质可以达到100LL的性能要求。Hackman说：“在进行了二十年的研究后，没有发现任何一种无铅配方既可以达到现有飞行设备对辛烷值的要求，又能同时保持航空汽油的安全质量性能，如蒸气压、冷热启动能力、材料兼容性、水分离、腐蚀性、储存稳定性、冻结点、毒性，以及成为一种成功替代品所需的其他特征。”

可能的解决方案

Hackman认为，工业界目前承认需要权衡100LL的替代品的利弊，并在寻找

2008年铅的分类排放清单

类 别	铅排放量（吨）
飞行器	571.49
工业生产过程	248.06
发电	59.78
工业锅炉	48.38
废物处理	11.46
商业/机构的燃料燃烧	7.40
溶剂使用	5.20
民用燃料燃烧	4.60
商用海洋船舶	2.90
火车	2.28
农业用地燃烧	0.97
加油站	0.52
其他非工业过程（未分类）	0.40
非公路柴油设备	0.03
散在汽油终端	0.02

来源：美国EPA

切实可行的更新换代产品。但这个过程将会比较漫长。联邦航空事务局于2011年宣布将在2018年前制造出一种无铅燃料，同时成立了无铅航空汽油过渡政策委员会（Unleaded Avgas Transition Aviation Rulemaking Committee）以应对此事。该委员会成员包括EPA代表、工业贸易组织如飞行器业主和飞行员协会及国家航空运输协会、燃料制造商和飞行器生产商。（Keever说，“地球之友”因得知委员会的活动是非公开而拒绝参与该委员会）。该委员会于2012年发布了一份报告，提出用11年时间确定及批准一种无铅航空汽油的程序和标准建议。

联邦航空事务局采纳了上述委员会的许多建议，并成立燃料项目办公室以对新燃料的认证进行监管。该机构目前每年拨款200万美元用于研究和发展，虽然这笔钱仅仅是委员会要求的一部分。事务局的White称，上述过程是开放式的，事务局预计至少认证一种针对目前100LL的无铅改进产品（这将使辛烷值降低到91~94之间），以满足诸多活塞发动机式飞行器的需求。事务局同时也计划评价哪些改进措施将有益于高性能发动机使用无铅版本的100LL，尽管此举可能导致性能的降低。

另一种选择是在逐步将航空汽油中的铅剔去的同时对发动机进行相应改进。此外还有一种方法，即开发出不止一种燃料，以分别满足不同性能飞行设备的需求。

一些观察家认为最后这种解决方案早已被工业界所认同。根据White的说法，美国大部分活塞发动机式飞行设备—工业界认为大约为75%—根本不需要高辛烷值的航空汽油。普通机动车用无铅汽油只要不含乙醇，也可以满足绝大部分飞行器的使用要求。这种燃料通常也称做autogas或mogas，与100LL相比具有价优量大的优势。

虽然大部分年代较早的活塞发动机式飞行设备并未获得使用机动车汽油的出厂许可，但约有60000架飞行器—相当于活塞发动机式飞行设备总数的1/3—已经获得了机动车汽油的使用许可和加油必需的燃料盖封条。上述说法来源于北卡罗莱纳州一位名叫Kent Misegades的飞行员，他同时是“航空燃料俱乐部”（Aviation Fuel Club）的发起者之一。该俱乐部提倡使用机动车汽油替代航空汽油。Kent Misegades还认为，几乎所有最新一代的活塞发动机都具有使用机动车汽油的出厂许可，至于剩下的约1/4（航空燃料俱乐部认为只有17%~20%左右）仍然依赖高辛烷值航空汽油的活塞发动机式飞行设备，其中大部分经过现有技术改造也可以使用机动车汽油。

市场因素

Misegades说，虽然不含乙醇的机动车汽油已经越来越少，但是使用它最大的障碍却是：绝大部分美国机场并不供应这种汽油。“他们想为那些产量极少的专业化高性能发动机制造出某种精品燃料，”他如此评论联邦航空事务局的委员会，“但仅仅使用更多的机动车汽油，就可以在一年内显著减少铅排放量。”他说上述情况在欧洲的大部分小型通用航空机场已经开始实行。2012年10月，国会议员、众议院能源和商务委员会（House Energy and Commerce Committee）的高级成员Henry Waxman（共和党，加州），在给联邦航空事务局的一封信中陈述了类似的观点。

White同意使用更多的机动车汽油是个好主意，但他同时指出，不能使用机动车汽油为燃料的高性能飞行器的飞行率远高于可以机动车汽油为燃料的飞行器。根据工业界未发表的估计数据，前者航空汽油消费占总消费量的70%左右。此外，国家航空运输协会监管事务主任、联邦航空事务局委员会成员Michael France认为，供应什么类型的燃料是由市场而非联邦航空事务局决定。而且供应商相信，在机场已经供应100LL的情况下，市场并不支持与供应机动车汽油或其他燃料相关的成本支出。他解释说，航空汽油的市场非常小，大部分通用航空机场及其燃料供应商不乐意增加支出，提供供应另外一种燃料所需要的油箱和其他设备。France说：“我们支持寻找一种替代燃料以满足所有人的需求，与汽车工业转变类似的那种两级解决方案在航空业是行不通的。”

市场摇摆的征象之一是，2011年联邦航空事务局批准了一种可用于所有活塞发动机式飞行器的燃料，该燃料的最大含铅量较100LL低19%。这种新燃料称为100VLL（VLL是“very low lead”的缩写）。White说市场上的某些100LL实际上达到了上述新100VLL的标准；事实上，来自89份100LL样品的平均数据显示，市售航空汽油只是稍稍超过了100VLL的标准。虽然含铅量更低的航空汽油已经在活塞发动机式飞行器上投入实用，White说他并未见到任何单独出售的100VLL，因为市场上没有相应的需求。此外也没有法律条文硬性规定必须供应该产品。

“我们可以批准燃料，可以认证能使用那些燃料的飞行器和发动机，我们之前已经这么做了。”White说，“但我们如何能克服障碍，通过市场运作使得机场可以供应哪种燃料呢？这的确是我们面临的巨大挑战。”

当然，EPA的“危害发现”可以做到这一点。目前至少有一个联邦机构，还有航空和石油工业以及环境组织认为，含铅航空汽油的时日不多了。剩下的问题是如何替代它，要采取多快的步伐，工业界能否在EPA决定是否要管制前找到解决方法。就当下情况而言，这个过程可能会如同长途飞行一样漫长。

Rebecca Kessler，居住在罗得岛普罗维登斯（Providence，Rhode Island），是科学和环境的新闻记者。

译自*EHP* 121(2):A54–A57 (2013)
翻译：吴少伟

***本文参考文献请浏览英文原文**

原文链接

http://dx.doi.org/10.1289/ehp.121-a54