

民航空行业标准
《航空燃油中碳-14 生物基含量的测定
液体闪烁计数直接测量法》
(征求意见稿)

编制说明

《航空燃油中碳-14 生物基含量的测定 液体闪烁计数直接测量
法》编制组
2025 年 11 月

一、工作简况

(一) 任务来源

《航空燃油中碳-14 生物基含量的测定 液体闪烁计数直接测量法》为 2025 年标准计划内项目，标准编制周期为 12 个月。该标准由民航局航空器适航审定司提出，牵头起草单位为中国民用航空总局第二研究所。

(二) 主要起草单位和编制组成员

主要起草单位：中国民用航空总局第二研究所。

编制组成员：柳华等。

(三) 标准制定的背景、目的和意义

1. 研究背景

(1) 顺应民航绿色发展，促进可持续航空燃料（SAF）可持续溯源技术跟踪

我国 SAF 的使用将在未来几十年内迎来大规模增长，作为履约减排的 SAF，其使用量与运营商的经济效益、减碳效果、碳交易和碳税息息相关，需要从交易结算、账务核对以及技术监控等多方面进行溯源跟踪，若无法溯源，将阻碍 SAF 产业有序健康发展。

顺应民航绿色发展的大势，必须加大力度促进 SAF 可持续溯源技术的跟踪与发展。通过不断跟踪和更新这些技术，更好地了解 SAF 的环保性能和经济效益，为民航业的绿色发展提供有力的技术支撑。这不仅是推动民航业绿色转型的必由之路，也是实现我国碳达峰、碳中和目标的重要举措。

（2）航空燃料中生物基含量测定标准的国内外情况

国际通用且适用于液体燃料的生物基含量测定标准有 ASTM D6866 《Standard Test Methods for Determining the Biobased Content of Solid, Liquid, and Gaseous Samples Using Radiocarbon Analysis》及 EN 16640 《Bio-based products - Bio-based carbon content - Determination of the bio-based carbon content using the radiocarbon method》，其中 EN 16640 在石油产品测试部分参照 ASTM D6866 的方法开展。ASTM D6866 标准使用加速器质谱法（Accelerator Mass Spectrometry，AMS）和液体闪烁计数法（Liquid Scintillation Counting，LSC）两种方法对燃料中的放射性碳含量进行测试，进一步计算得到燃料中生物基含量。ASTM D6866 标准提供方法虽然能够提供精确的结果，但流程繁琐，需要对样品进行复杂的前处理过程，再利用加 AMS 或 LSC 测定生物碳百分比。ASTM D6866 标准方法的显著缺点是制样步骤复杂，且所需设备昂贵、技术门槛高，不适用于日常大量产品的合格检验。

国内关于液体燃料中生物基含量测定标准有由中国石油化工股份有限公司石油化工研究院起草的 NB/SH/T 6044 《液体石油产品中含放射性碳的生物基含量测定 加速器质谱法》，该标准采用与 ASTM D6866 一致的试验方法，且采用的加速器质谱仪设备从国外进口，费用昂贵，运行成本高，技术难度大，目前并未形成可行的试验能力及条件。

（3）国内对航空燃料中生物基含量测定标准的需求

当前，我国缺乏成熟的生物基含量测定方法标准，国内开展碳十四（¹⁴C）检测的途径仅有两种，一是外资三方检测机构按照 ASTM D6866 进行测试，二是放射性元素研究单位开展非标试验。在 SAF 的生物基测定上，国内没有自主方法标准，我国不得不依赖国外的方法标准。这一现状不仅对我国生物航煤发展不利，更对后续的 SAF 产业发展构成了制约。

2. 研究目的和意义

制定民用航空燃料生物基含量测定的行业标准不仅关乎我国打破技术瓶颈，实现国内航空燃料生物基含量检测标准化的目标，更是我国推进自主检测方法，替代国外技术，增强关键技术定标能力的重要举措。通过制定这一标准，我国将能够服务于国内生物质燃料供应链上的每个环节，形成全链条溯源，为我国航空生物质燃料的高质量发展与应用提供有力保障。

（四）主要工作过程

1. 组建编制组

2025 年 1 月工作启动，成立标准编制组，通过组织协调、研制框架、方案细化，内容编写，技术测试等工作，开展标准初稿编制。

2. 研究过程

（1）2025 年 2 月至 3 月，研究学习 ASTM D6866、EN 16640 和 NB/SHT 6044 等测试标准，了解加速器质谱法和液体闪烁计数法检测生物基含量的原理、步骤和指标要求；

与中国辐射防护研究院等放射性元素测试研究单位沟通，了解基于放射性元素含量测定生物基含量的原理、主要影响因素及方法适用性。

(2) 2025年4月，与不同液体闪烁计数器生产厂家就设备硬件优化及测试原理等，为定制和筛选试验耗材、确定试验条件和结果判定依据提供数据支持，以提高检测标准与航空生物质燃料的适用性。

(3) 2025年4月至7月，考察所建立测试方法的重复性和操作流程的稳定性，并确定该方法的检测精度和重复性参数，研究基于液体闪烁仪的民用航空燃料中含放射性碳的生物基含量直接测量法，形成《航空燃料中¹⁴C生物基含量的测定 液体闪烁计数法》初稿。

(4) 2025年6月至7月，开展生物基含量测试方法标准编制工作，完善《航空燃料中¹⁴C生物基含量的测定 液体闪烁计数法》初稿。

3. 开题评审

2025年5月14日，中国民航科学技术研究院（以下简称“航科院”）组织召开了标准开题评审会。编制组从背景和意义、研究内容、技术路线、研究计划与实施方案和经费说明等方面进行了汇报，评审组对“航空燃油中¹⁴C生物基含量的测定 液体闪烁计数法”项目的技术内容进行了评审，一致认为该项目目标明确、内容全面、技术方案可行、实施计划合理，同意该项目通过开题评审。

4. 标准起草

2025年1月至2025年8月，开展标准起草工作。编制组分析测试数据、评估自主方法可行性、编制初稿，向行业相关方函询征求意见，编制组对专家提出的关于计算公式调整等意见进行整理汇总，并与专家讨论确定修订内容，完善标准文本。

5. 中期评审

2025年9月9日，中国民航科学技术研究院（以下简称“航科院”）组织召开了《航空燃油中¹⁴C生物基含量的测定 液体闪烁计数法》民航行业标准技术（中期）评审会，适航司派员参加会议。评审组7人听取了标准起草单位对《航空燃油中¹⁴C生物基含量的测定 液体闪烁计数法》征求意见草案编写情况的汇报，并逐条评审，形成修改意见5条。评审组一致同意《航空燃油中¹⁴C生物基含量的测定液体闪烁计数法》通过技术评审（中期）。其中，评审组专家建议修改标准题目为《航空燃油中碳-14生物基含量的测定 液体闪烁计数直接测量法》。

6. 形成标准征求意见稿

2025年9月至11月，在评审专家的意见建议基础上，编制组不断修改完善标准文本，同时邀请行业内专家对修改后的标准进行审核，依据审核意见，持续进行修订完善，形成标准征求意见稿。

二、编写原则和主要内容（如技术指标、参数、公式、性能要求、测试方法、测试规则等）的编写论据（包括计

算、测试、统计等数据），修订标准时应说明主要技术内容的修改情况

（一）标准编写原则

1. 符合性原则。本标准按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》给出的规则起草，遵守《中华人民共和国标准化法》《中华人民共和国标准化法实施条例》等标准化法律法规规章要求。

2. 适应性原则。通过调研行业实际现状和迫切需求，坚持问题导向和目标导向，重点在建立便捷的航空燃油生物基检测方法，统筹考虑标准要求的普适性和合理性，推进标准编制。

（二）标准主要内容

本标准针对航空燃油中生物基含量测定，建立基于液体闪烁计数器的生物基含量直接测定法。

1. 第1、2、3章，为标准的常规性描述，包括范围、规范性引用文件、术语与定义。
2. 第4章概述了方法内容。
3. 第5章简述方法所需仪器设备和试剂耗材。
4. 第6章规定了正式试验前样品的取样工作。
5. 第7章规定了正式试验步骤，包括样品制备、最优计数比、淬灭曲线建立、样品测试、背景噪声扣除以及结果计算。
6. 第8章规定了结果报告内容。

7. 第9章规定了方法精密度内容。

三、是否涉及专利，涉及专利的，说明专利名称、编号及相关信息

本标准不涉及专利。

四、主要测试或验证的分析、综述报告、技术论证、预期的经济效益和社会效益

(一) 主要测试或验证的分析、综述报告、技术论证

1. 仪器与材料

1.1 液体闪烁计数器：300 SLL，芬兰 Hidex 公司生产。

1.2 天平：精确到 0.1 mg。

1.3 样品瓶：20 mL 低钾玻璃瓶或塑料液闪瓶，瓶体由不易与航空燃油及闪烁液发生反应的材质组成（如：高密度聚丙烯和聚四氟乙烯）。

2. 试剂

2.1 闪烁液：烁液应与航空燃油互溶，并可形成均质透明溶液，在试验过程中不应分层。

2.2淬灭系列源： ^{14}C -正十六烷液体闪烁淬灭系列源标准物质，活度为（500~5000）贝克（Bq）。

2.3 空白样品：不含有 ^{14}C 的样品（如纯石油基航空燃油样品），且与闪烁液互溶，用于测定过程空白计数，并予以扣除。

3. 方法原理

^{14}C 是自然界中存在的一种放射性同位素，半衰期约为 5730 年。它通过宇宙射线与大气中的氮原子反应持续生成，

并参与碳循环。生物质（如植物或藻类）在生长过程中通过光合作用吸收大气中的二氧化碳（含 ^{14}C ），因此现代生物质中的 ^{14}C 含量与当前大气水平一致，并且与大气 ^{14}C 含量动态平衡。而化石燃料（如石油）中的碳来源于远古生物，其 ^{14}C 已因衰变几乎耗尽（ ^{14}C 含量趋近于零），如图 1 所示。通过测定燃料中的 ^{14}C 含量，可以区分生物基碳（可再生来源）与化石碳（不可再生来源）。

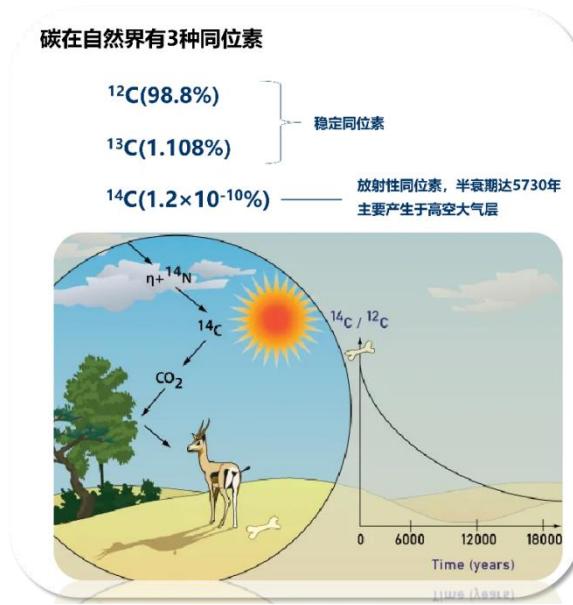


图 1 基于 ^{14}C 测量生物基含量的原理

基于此，含有生物质来源的航煤与传统航煤虽在基础理化性能上无明显区别，但在 ^{14}C 含量上具有差别，并且 ^{14}C 含量与生物质燃料含量成正比。因此，通过 LSC 法测量航空燃料中的 ^{14}C 含量，与现代大气中的 ^{14}C 进行比较，可获得航空燃油中生物基的含量，测试原理如图 2 所示。

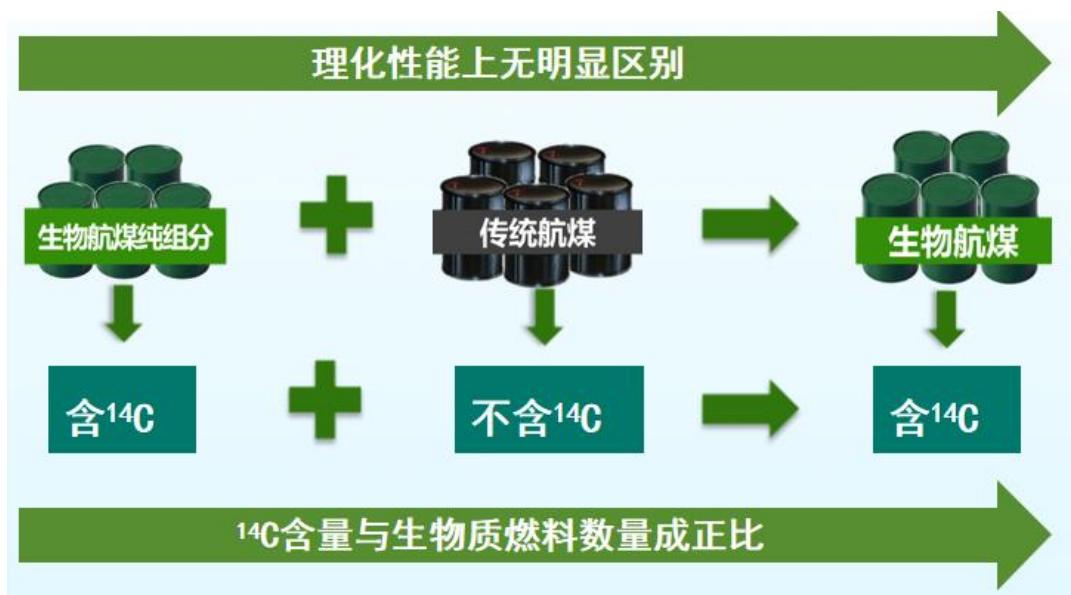


图 2 基于 ^{14}C 测量航空燃油中生物基含量的原理

4. 测试内容

4.1 测试步骤

编制组建立了基于液体闪烁计数器的生物基含量直接测试方法，测试步骤经过样品制备、淬灭曲线建立、样品测试、背景噪声扣除、结果计算 5 个步骤。样品制备步骤：仅需将待测航空燃油与闪烁液等比例混合，无需进行样品分解及苯合成等步骤，将配制好的测试样品放置于带有三符合探测器（TDCR 功能）的液体闪烁技术器中进行测试，经过计算获得航空燃油中的生物基含量。

在方法建立过程中，编制组主要考察了方法的准确性、检出限、精密度等，并与加速器质谱法进行对比。

4.2 方法准确性考察

本标准通过试验人员进行盲样测试方式，考察测试值与理论值间的偏差，喷气燃料样品结果如表 1 所示。

表 1 喷气燃料样品准确性试验结果

| 序号 | 理论值 (m/m%) | 试验值 (m/m%) | 偏差 (%) |
|----|------------|------------|--------|
| 1 | 4.79 | 4.73 | -1.25 |
| 2 | 9.61 | 9.93 | 3.32 |
| 3 | 19.30 | 18.78 | -3.35 |
| 4 | 29.07 | 29.00 | 0.25 |
| 5 | 38.94 | 40.08 | 2.93 |
| 6 | 48.89 | 49.00 | 0.23 |
| 7 | 58.93 | 57.80 | -1.91 |
| 8 | 69.06 | 70.35 | 1.87 |
| 9 | 79.28 | 81.23 | 2.46 |
| 10 | 89.59 | 90.15 | 0.62 |
| 11 | 100.00 | 100.83 | 0.83 |

石脑油样品结果如表 2 所示。

表 2 石脑油样品准确性试验结果

| 序号 | 理论值 (m/m%) | 试验值 (m/m%) | 偏差 (%) |
|----|------------|------------|--------|
| 1 | 18.56 | 18.62 | 0.34 |
| 2 | 47.68 | 47.53 | 0.32 |
| 3 | 100.00 | 99.57 | 0.43 |

4.3 方法检出限考察

本标准对方法可检测的最小可探测活度 (MDA) 进行了测试，结果如表 3 所示。测试采用不含有生物基的传统航煤进行测试，测试不同时长下的 MDA。

表 3 可检测的最小可探测活度 (MDA) 结果

| 序号 | 测量时间 (s) | MDA (Bq) |
|----|----------|----------|
|----|----------|----------|

| | | |
|---|-------|-------|
| 1 | 14400 | 0.036 |
| 2 | 21600 | 0.029 |
| 3 | 28800 | 0.025 |
| 4 | 36000 | 0.022 |
| 5 | 43200 | 0.020 |
| 6 | 86400 | 0.014 |

4.4 方法精密度考察

4.4.1 重复性考察

参与重复性试验的实验室有两家，编制组针对 11 个样品进行重复性试验，结果如表 4 表 4 重复性试验

表 4 重复性试验结果

单位：%

| 序号 | 实验室 1 | | | 实验室 2 | | | 重复性方差 | 重复性 |
|----|--------|---------|------|--------|---------|------|--------|--------|
| | 平行测试次数 | 平均值 (%) | 标准差 | 平行测试次数 | 平均值 (%) | 标准差 | | |
| 1 | 4 | 4.73 | 0.72 | 4 | 4.36 | 0.12 | 0.2638 | 0.5136 |
| 2 | 4 | 9.93 | 0.43 | 4 | 8.87 | 0.21 | 0.1136 | 0.3371 |
| 3 | 4 | 19.03 | 0.86 | 4 | 18.58 | 0.32 | 0.4182 | 0.6467 |
| 4 | 4 | 29.00 | 0.47 | 2 | 28.13 | 0.20 | 0.1748 | 0.4181 |
| 5 | 4 | 40.08 | 0.75 | 2 | 38.32 | 0.33 | 0.4495 | 0.6704 |
| 6 | 10 | 48.91 | 0.58 | 4 | 48.37 | 0.14 | 0.2539 | 0.5039 |
| 7 | 10 | 57.94 | 0.76 | 4 | 58.52 | 0.35 | 0.4635 | 0.6808 |
| 8 | 10 | 70.28 | 0.89 | 4 | 68.50 | 0.32 | 0.6153 | 0.7844 |
| 9 | 10 | 80.06 | 1.47 | 4 | 79.26 | 1.15 | 1.9451 | 1.3947 |

| | | | | | | | | |
|----|----|--------|------|---|-------|------|--------|--------|
| 10 | 10 | 89.66 | 1.14 | 4 | 89.64 | 0.40 | 1.0116 | 1.0058 |
| 11 | 4 | 100.83 | 1.86 | 4 | 99.09 | 1.32 | 2.6039 | 1.6137 |

表 5 重复性限值

| 生物基含量 (m/m%) | <5.00 | 10.00 ~ | 30.00 ~ | 50.00 ~ | 70.00 ~ |
|-----------------|-------|---------|---------|---------|---------|
| | | 20.00 | 40.00 | 60.00 | 100.00 |
| 测试时长 (h) | 12 | 10 | 8 | 6 | 4 |
| | | 0.51 | 0.65 | 0.67 | 0.68 |
| 重复性要求 (m/m%) | | 0.65 | 0.67 | 0.68 | 1.61 |

4.4.2 再现性考察

两个实验室针对 11 组样品生物质含量进行再现性试验，结果见表 6 和表 7。

表 6 再现性试验结果

单位：%

| 序号 | 实验室 1 | | | 实验室 2 | | | 再现性方差 | 再现性 |
|----|--------|---------|------|--------|---------|------|--------|--------|
| | 平行测试次数 | 平均值 (%) | 标准差 | 平行测试次数 | 平均值 (%) | 标准差 | | |
| 1 | 4 | 4.73 | 0.72 | 4 | 4.36 | 0.12 | 0.2691 | 0.5187 |
| 2 | 4 | 9.93 | 0.43 | 4 | 8.87 | 0.21 | 0.6417 | 0.8011 |
| 3 | 4 | 19.03 | 0.86 | 4 | 18.58 | 0.32 | 0.4127 | 0.6424 |
| 4 | 4 | 29.00 | 0.47 | 2 | 28.13 | 0.20 | 0.4877 | 0.6984 |
| 5 | 4 | 40.08 | 0.75 | 2 | 38.32 | 0.33 | 1.8297 | 1.3527 |
| 6 | 10 | 48.91 | 0.58 | 4 | 48.37 | 0.14 | 0.3553 | 0.5960 |
| 7 | 10 | 57.94 | 0.76 | 4 | 58.52 | 0.35 | 0.5520 | 0.7432 |

| | | | | | | | | |
|----|----|--------|------|---|-------|------|--------|--------|
| 8 | 10 | 70.28 | 0.89 | 4 | 68.50 | 0.32 | 2.0883 | 1.4451 |
| 9 | 10 | 80.06 | 1.47 | 4 | 79.26 | 1.15 | 1.9243 | 1.3872 |
| 10 | 10 | 89.66 | 1.14 | 4 | 89.64 | 0.40 | 0.8348 | 0.9137 |
| 11 | 4 | 100.83 | 1.86 | 4 | 99.09 | 1.32 | 3.4668 | 1.8619 |

表 7 再现性限值

| 生物基含量 (m/m%) | <5.00 | 10.00 ~ 20.00 | 30.00 ~ 40.00 | 50.00 ~ 60.00 | 70.00 ~ 100.00 |
|-----------------|-------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| 测试时长 (h) | 12 | 10 | 8 | 6 | 4 |
| 再现性要求 (m/m%) | 0.52 | 0.80 | 1.35 | 0.74 | 1.86 |

5. 总结

编制组使用自主建立的液体闪烁计数法开展了含有不同生物航煤含量的航空燃油的生物基含量试验，本方法样品处理简便、测试过程简便，适用于生物基含量在 1% ~ 100%（质量百分数）的航空燃油。

（二）预期的经济效益

无。

（三）预期的社会效益

本标准能够推动 SAF 精准检测技术国产化，助力民航业年减排，加速国家“双碳”目标实现，同时打破国际技术垄断，提升我国在航空碳计量领域的国际话语权。产业链层面，可带动生物质原料收集、检测设备制造等上下游协同发展。

五、采用国际标准和国外先进标准的程度以及与国际、国外同类标准水平的对比情况

本标准不存在版权问题。

目前，国际通用且适用于液体燃料的生物基含量测定标准有 ASTM D6866 及 EN 16640，其中 EN 16640 在石油产品生物基含量的测试部分参照 ASTM D6866 的方法开展。ASTM D6866 标准使用质谱法和辐射法两种方法对燃料中的放射性碳含量进行测试，进一步计算得到燃料中生物基含量。ASTM D6866 标准提供方法虽然能够提供精确的结果，但流程繁琐，需要对样品进行复杂的前处理过程，再利用 AMS 或 LSC 测定生物碳百分比。

AMS 和 LSC 两种方法的特点见表。

表 8 AMS 和 LSC 特点对比

| 方法 | 其他要求 | 试验时长 | 相对标准偏差 | 设备价格 |
|-----|----------------------|-------------|-----------|------|
| LSC | 普通实验室 | (4-12) h | 0.2% ~ 5% | 低 |
| AMS | 可进行大型安装的实验室；配备石墨转换装置 | (10-30) min | 0.2% ~ 2% | 高 |

AMS 是一种高灵敏度、高精度的放射性同位素分析技术，用于直接测量样品中的 ^{14}C 原子数量。ASTM D6866 标准规定的试验步骤如下：首先，样品经过燃烧或化学处理转化为二氧化碳 (CO_2)，随后在真空系统中转化为石墨或碳化锂 (Li_2C_2)，并沉积在金属靶上。接着，样品被送入

加速器质谱仪，在强电场中电离成碳离子（ $^{12}\text{C}^-$ 、 $^{13}\text{C}^-$ 、 $^{14}\text{C}^-$ ），并通过磁分析器和静电偏转器分离不同质量的离子。由于 ^{14}C 极其稀少（自然界中 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比例约为 1.2×10^{-12} ），AMS利用高能加速（通常达数百万电子伏特）和粒子探测器（如气体电离室或半导体探测器）精确计数 ^{14}C 原子。最终， $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值通过与现代碳标准（如NIST SRM 4990C）对比计算，并校正大气核爆效应（REF因子），得到样品的生物基碳含量。

ASTM D6866 Method C采用LSC法测定固体、液体和气体样品中的生物基碳含量，其核心原理是通过检测样品中放射性碳(^{14}C)的衰变信号来区分生物源和化石源碳。首先，样品中的碳被转化为苯(C_6H_6)，以提高检测灵敏度并减少淬灭效应。苯与闪烁液（如PPO/POPOP溶解于甲苯）混合后， ^{14}C 衰变释放的 β 粒子激发闪烁剂发光，LSC通过光电倍增管(PMT)捕获这些光子信号。计数结果与现代碳标准（如NIST SRM 4990C）对比，得到样品的现代碳百分比(pMC)，再除以大气校正因子(REF，如2025年 $\text{REF}\approx 100 \text{ pMC}$)计算生物基碳含量(%生物基=pMC/REF×100)。

ASTM D6866标准方法的显著缺点是制样步骤复杂，都需要经过复杂样品处理步骤，且该前处理步骤对试验结果准确度影响较大，对试验人员操作技术水平要求高，制样所需设备昂贵，不适用于普通实验室日常大量产品的合格检验。

本方法基于液体闪烁计数器，建立了一种无需样品前处理的直接测量法，试验样品制备无需将样品燃烧后制备为本溶液，仅需将燃油样品与闪烁液直接混合，极大地简化了以往液体闪烁计数法的试验步骤，进一步降低了试验成本，提升测试便捷度。

六、与有关的现行法律、行政法规、民航规章、国家标准和行业标准的关系

国内关于液体燃料中生物基含量测定标准有由中国石油化工股份有限公司石油化工研究院起草的 NB/SH/T 6044《液体石油产品中含放射性碳的生物基含量测定 加速器质谱法》，该标准同样采用加速器质谱法进行测试，测试步骤仍需经过从样品转化为石墨的样品前处理过程。设备费用昂贵，运行成本高，技术难度大。

本标准方法基于液体闪烁计数器，建立了一种无需样品前处理的直接测量法，与国内现行法律、法规和国家标准、行业标准相一致，无冲突。

本标准的制定能够完善中国民用航空技术标准规定 CTSO-2C701a 中对航空生物质燃料质量监管及安全使用相关要求。

七、重大不同意见的处理和依据

无。

八、贯彻标准的要求和措施建议（包括组织措施、技术措施、过渡办法等）

建议本标准发布实施后，行业标准化管理单位及时组织本标准宣贯，强化标准技术内容对后续工作的指导。

九、废止现行有关标准的建议

无。

十、重要内容的解释和其他应说明的事项

无。