

蔗和大豆等作物的种植需要消耗大量的水和肥料使用, 围垦种植会使一个国家的水资源紧张, 造成水资源短缺和水富营养化, 这些问题也是第一代原料的主要缺点, 因为大多数粮食作物通常需要较高的水分和养分需求。

此外, 粮食作物用于生产生物航空燃料, 会与粮食生产争夺土地、水和养分, 这与我国国情是不相符的, 粮食安全攸关人类生存之本, 牺牲粮食安全无异于饮鸩止渴<sup>[12]</sup>。

### 3.2 第二代原料——非食用能源作物和废弃生物质

非食用的第二代原料可以规避第一类原料的食物 - 燃料困境, 主要包括非食用能源作物和废弃生物质。废弃生物质又进一步分类为农业和林业残留物以及食品和城市垃圾。第二代原料的主要特点是富含油和糖类成分。但与第一代原料对比, 第二代原料的糖组分被植物细胞壁以及木质纤维素所包裹, 需通过酶 / 微生物和 / 或热化学转化进行预处理, 才能转化为生物航空燃料<sup>[6]</sup>。这些预处理所需的成本都相对较高, 从而使第二代原料生产生物航空燃料的利用率低于第一代原料<sup>[13]</sup>。

#### 3.2.1 非食用能源作物

油料能源作物, 如麻疯树和蓖麻等, 由于其油脂对人类食用有毒, 不具有食用价值<sup>[14]</sup>。麻疯树和蓖麻的含油量分别为种子重量的 30%~40% 和 50%~60%, 通过酯交换、催化裂解 (热解) 或加氢处理可以将麻疯树和蓖麻生产航空燃料<sup>[15]</sup>。2008 年 12 月 29 日, 新西兰航空公司通过麻风籽生产的燃料与传统石化燃料各 50% 在波音 747-400 飞机上试飞成功, 但是, 以麻疯树和蓖麻籽作为生物航空燃料原料的市场尚未成熟<sup>[10]</sup>。

亚麻荠, 原产于欧洲东南部和亚洲西南部, 现广泛种植于北美、欧洲、大洋洲及亚洲等地区, 是一种十字花科油料作物。其种子含油量约占 34%~45%, 单位油产量 (450~900kg/ha-1) 高于大豆与油菜<sup>[16]</sup>。2009 年 1 月 30 日, 日本航空在东京羽田机场通过生物燃料与传统石化燃料各 50% 试飞一架使用生物燃油的波音 747-300 飞机。其中, 生物燃料由亚麻荠油 (84%)、麻风树油 (低于 16%) 以及海藻 (低于 1%) 组成<sup>[10]</sup>。

除上述几种植物外, 柳枝稷、芒属、象草 (紫狼尾草) 等作为生产生物航空燃料前驱体也有相关研究。但是多数普通油料作物种子油的主要脂肪酸为 18 碳的脂肪酸, 直接用于加工航空燃油质量欠佳和工序繁长, 所含中链脂肪

酸更有利于生产去垢剂、肥皂、化妆品、表面活性剂和润滑油等<sup>[17]</sup>。

相比于草本植物, 木本植物具有更高的单位面积生物量可获得性和更低的物流成本<sup>[18]</sup>。杨树是温带多年生乔木, 全球有 70 个国家种植杨树, 其中 91% 种植在天然林中, 其余种植在人工林中, 年平均产量为 9t/ha。杨树可以通过热解和发酵得到杨木衍生碳氢化合物, 后进一步加氢处理得到生物航空燃料<sup>[19]</sup>。柳树为多年生开花乔木, 生长于温带至寒带地区, 年产量在 4-10t/ha<sup>[20]</sup>, 可先转化为醇类、合成气和热解油等前驱体, 再进一步提炼得到生物航空燃料。桉树是原产于澳大利亚的速生树种, 全球人工林面积超过 2×10<sup>7</sup> 公顷, 年平均生产力为 10t/ha<sup>[21]</sup>, 可通过醇喷合成工艺 (ATJ) 先转化为乙醇或丁醇, 后进一步得到喷气燃料。将木本植物转变生产生物航煤, 现仍处于实验研究阶段, 并没有相关试飞报道。

非食用能源作物因存在与粮食生产竞争适宜土地, 并向林地扩张的风险。若需将能源作物纳入生物航空燃料原料组成, 则需考虑土地的合理利用性。此外, 高昂的经济成本也阻碍了大多数木质纤维素原料的商业化。

#### 3.2.2 废弃生物质

通过废弃生物质生产生物航空燃料, 不存在土地需求且能实现废物二次利用。第一类废弃生物质为农林剩余物, 主要是由种植、收获、采伐后剩余的木质纤维素副产品 (农作物秸秆、果壳等), 以及伐木未加工部分 (树叶、树桩、树枝和树梢)、木浆、木片、废旧木材、刨花和锯末等<sup>[22]</sup>。将这些木质纤维素废弃物转化为合成气、热解油、乙醇和丁醇等喷气燃料前驱体, 再通过醇喷合成工艺 (ATJ)、直接法糖制烃类喷气燃料合成工艺 (DSHC) 转化为生物航空燃料已有相关研究。

食品和城市垃圾是第二类可考虑作为生物航空燃料生产原料的废弃生物质。低成本的废食用油是唯一通过酯类和脂肪酸类加氢工艺 (HEFA) 而实用化的废液。通过废食用油及其衍生物作为生物航空燃料用于试飞和商业航班已有许多报道。2020 年 8 月, 镇海炼化建立了我国首套生物航煤工业化设备, 该设备以餐饮废油为原材料, 设计加工量为 10 万吨/年。2022 年 12 月 15 日, 中国国际货运航空公司的波音 777 型货机首次加注了生物航空燃料, 由杭州经 12 小时飞行到达比利时。这是我国自主研发首批大规模生产生物航煤以来, 首次开辟可持续航空燃料的国际货运航线<sup>[24]</sup>。