

国外空间食用作物栽培研究进展

摘要：2015年8月10日，国际空间站乘员首次吃上了利用 Veggie 蔬菜生产系统在轨种出的红萝蔓生菜。Veggie 是第一个用来研究空间微重力下生产食物的系统，它的成功标志着空间植物基础科学研究经过40多年的探索，结出了里程碑式的硕果，也将使国际空间站乘员定期吃到在轨种植的新鲜蔬菜作为膳食补充成为可能，这不仅可以丰富长期以来以预包装食品为主的航天食品系统，对保障乘员身心健康及工作绩效发挥重要作用，而且对未来深空探索前哨基地粮食蔬菜作物种植具有重要的指导和借鉴意义。本文就国外在空间食用作物栽培技术领域的研究进展进行了综述，并就未来发展趋势及挑战进行了展望。

一、引言

2015年8月10日，国际空间站上的航天员首次吃上了利用 Veggie 蔬菜生产系统在轨种出的红萝蔓生菜，这次收获的生菜航天员仅食用一半，而另一半送回地面用于研究分析。Veggie 蔬菜生产系统的成功，其意义有以下四个方面：一是 Veggie 蔬菜生产系统是第一个用来研究空间微重力下生产食物的系统，它的成功标志着空间植物基础科学研究经过40多年的探索，结出了里程碑式的硕果；二是标志着空间植物栽培系统(空间植物生长舱)的研

发达到了一个新的高度；三是在轨成功种植蔬菜以及食品安全预防消毒配套措施的制定，使国际空间站乘员定期吃到在轨种植的新鲜蔬菜成为可能，航天食品系统将因此而得到进一步丰富，这对长期在轨乘员身心健康及工作绩效将具有积极意义；四是这项低地球轨道平台技术的成功，将对未来深空载人探索任务，如月球基地、火星基地就地生产大部分食物(粮食和蔬菜)和生物再生生命保障系统研究起到重要的支撑作用。

二、国外空间植物栽培舱的研究进展

空间植物栽培一直是载人空间计划的重要内容之一，从 1971 年“礼炮”1 号空间站开始的第一个有人参与的植物生长系统“绿洲”1 号实验开始，空间食用作物栽培实验研究已经走过了 45 年历程，先后有 21 个类型的植物生长舱(又称植物生长系统、植物栽培装置等)在轨运行(见图 1)，共开展了以食用作物为主的 40 多种植物的 50 多个空间栽培实验，实验内容主要包括空间植物栽培生长舱的研发和空间植物生理学基础研究。

植物生长舱研究主要从提供适宜的在轨受控环境相关技术出发，从适应所在航天器、实验研究目标需求、营养供给系统、光照系统、气体环境管理等方面不断进化与改进，从最初“绿洲”系列开始摸索微重力下植物生长所需要的适宜环境条件起，到目前国际空间站 Veggie 系统以比较精确的环境调控而实现叶菜类食用作物的正常收获，植物生长舱的配置已有了质的飞跃，Veggie 系统已经不是一个单纯的植物生理学基础研究舱，而是第一个空间食物生产实验系统。苏联早期研究人员将植物生长系统研发分为三代：第一代的最终目标是确定航天环境下植物生长的潜在约束条件，并为乘组提供心理安慰；第二代系统实际上是生物再生生保系统技术研发的原型；第三代具有生物再生生保系统功能，可以是航天器或空间站的一个组成部分，系统的使用寿命与航天器

相同，便于常规维护维修和可能的升级。如果按照这个划分依据，则迄今所有在空间运行过的植物生长舱都应列入第一代范围内。图 1 为 1971—2016 年间在低地球轨道航天器中运行的空间植物生长系统。

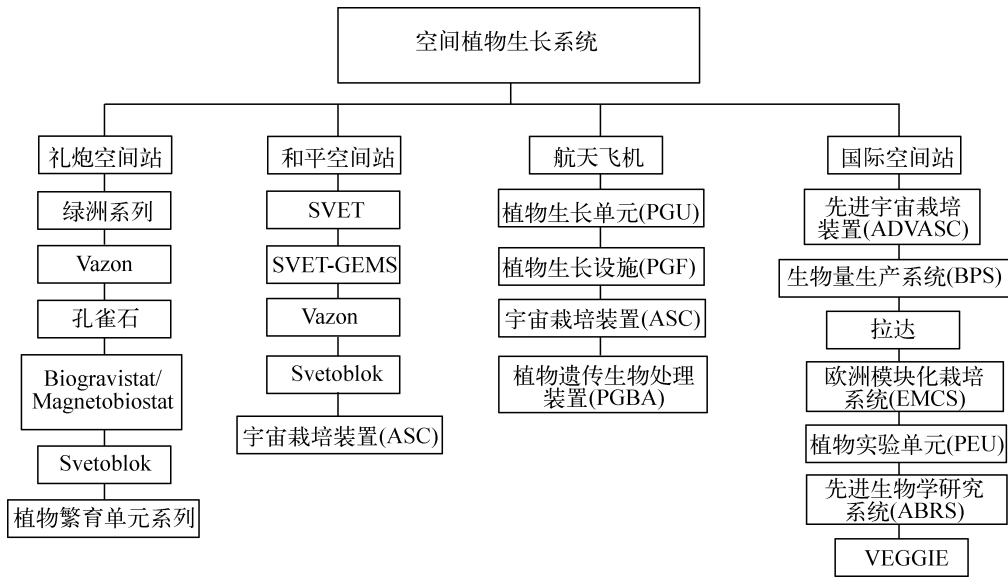


图 1 1971—2016 年间在低地球轨道航天器中运行的空间植物生长系统

除了在轨运行过的植物生长舱，还有许多从未实现的概念或还处于早期设计与概念阶段的系统，如俄罗斯的“维他环植物生长系统”、NASA 埃姆斯研究中心研发的“沙拉机器”等，目前 NASA 肯尼迪航天中心与轨道公司正在合作研发一款名为先进植物生境 (APH) 的生长舱，它整合了所有经微重力环境验证的植物生长技术，还采用了新的容错和恢复技术，以提高系统整体的效率、可靠性和稳健性，其关键子系统可在轨移除和替换。NASA 计划于 2017 年初在国际空间站运行该系统，最终在国际空间站部署一个科学实验架，它将成为国际空间站最大的植物生长舱，方便开展大型植物在轨多代研究，以了解微重力对植物的长期影响，同时也为将来生物再生生保系统植物可靠性和潜在用途进行验证。

NASA 计划在国际空间站剩余的寿命期内运行该系统。

三、空间植物栽培生理学研究进展

迄今为止，利用空间植物生长舱开展空间植物基础科学实验的材料大部分是食用作物，主要包括：大麦、甘蓝、胡萝卜、大白菜、水芹、黄瓜、矮化豌豆、亚麻、大蒜、韭菜、小扁豆、生菜、芜菁、芥菜、洋葱、西芹、豌豆、小萝卜、稻谷、大豆、菠菜、叶甜菜、西红柿、小麦等。根据当时运行的实验系统、任务安排，这些作物的栽培取得了不同程度的成功，但并不是所有的植物都达到了成熟状态。通过这些栽培实验，人类对空间食用作物栽培技术有了更多的认识。

(一) 微重力对植物生长发育的影响

当提供良好的通风时，植物可以在微重力下正常生长，空间与地面对照没有差异。人们最初认为，微重力会导致植物生长得较小，其繁殖也会被削弱，但是当改进了植物在空间生长的种植舱后，这些假象消失。植物对微重力的反应似乎还因种类和品系而不同，因此很难找出微重力下植物生长发育的普遍模式。

(二) 空间环境对植物生长的影响

早期开展的空间植物生长发育实验，多数将观察到的影响归于微重力，但实际上是由于航天飞行中空间环境的影响。

1. 细胞和生物化学水平的研究

尽管已经证实，在空间中给以足够的通风时，植物发育与地面相似，但给以低重力和超重力的变化时，植物次生代谢会受到影响，航天飞行环境下观察到的主要变化是营养物质的储藏，在轨生成的种子的营养成分和发育阶段不仅与地面不同，而且与回转器中也不同。空间生长植物在淀粉含量、代谢物合成方面的变化可能会影响到其种子的活力和营养物质含量，也可能对植物的

风味有影响，这可能会成为长期空间飞行任务的一个问题，因为乘组要以植物性膳食为主。

细胞生长与增殖是两个相关的过程，在 $1g$ 条件下，两者是结合在一起的，而在微重力环境下则是解偶联的，在重力减少的环境中，细胞生长与增殖会影响植物生长与发育，并由此影响到食物的生产。

微重力下植物基因的表达出现与地面不同的上调和下调情况，有人推测这是因为微重力被植物基因转录组感知为异常的应激环境，而植物基因组又缺乏足够应对基因。了解基因在微重力环境下的表达机制，将有助于选择能很好适应重力减少环境的植物，从而在遗传上设计出适应航天飞行和行星表面食物生产的植物。

2. 对植物器官的间接影响

尽管光合系统的活动以及一些与光合作用相关蛋白的表达会受到航天飞行的影响，但光合速度似乎不受微重力的影响。器官水平的变化主要是由缺少重力、流体行为改变(没有浮力驱动的对流)以及主导力(微重力条件下以表面张力占优势)等导致的间接结果。

在微重力条件下，水分围绕植物根部形成一个厚厚的边界层，由于根的呼吸，这个边界层内会缺氧，从而导致根部缺氧。因此在早期在轨植物实验中，经常会观察到植物出现类似缺氧的超级结构变化，因此非常需要研发微重力专用灌溉系统，从而能够提供水和营养，并使根部通气。

微重力下几乎没有自然对流，这个情况对植物生长有着直接的影响。事实上，由于没有足够的通风，植物叶子周围形成了厚厚的物质边界层，增加了扩散传递的阻力，其结果是在植物叶表面、根周围的气体交换减少，而由于植物的活动如呼吸作用、光合作用，诱使这些区域的某些气体耗尽(如 O_2 、 CO_2)，造成缺氧。

缺乏对流也会导致气体和挥发性有机物的累积，有时会导致

对植物生长有害的乙烯的浓度很高，由于乙烯具有植物毒性，能够阻断或诱导各种代谢通路，因此乙烯浓度高会抑制根和胚轴的生长。为了使植物能够在微重力下正常生长，确保发芽、繁殖等重要功能正常进行，必须给予充足的通风，并对植物周围的气体环境进行深入研究，这一点对于优化空间食物生产至关重要。

3. 形态变化

许多飞行实验证实，植物在微重力下发育正常，也就是说只要通风充足，植物的整体结构不会因缺乏微重力而发生改变。不过根部的生长比地面更随意，尤其是侧根趋于发育更多，而不是像地面有一个主根。已经对植物向性进行了广泛在轨研究，例如，已经证实拟南芥苗在微重力环境中比在地面重力场对蓝光有更大的向光反应。了解植物不同的向性生长机制及其如何影响植物的生长发育，将有助于我们更有效地利用植物为未来长期飞行任务进行食物生产。

四、空间食用作物生产风险控制

Veggie 是第一个设计用来研究空间微重力下生产食物的系统，生产出的作物是供国际空间站乘员作为膳食补充，因此必须遵守 NASA 食品微生物标准，为此项目团队制定了关于蔬菜生产单元的风险分析与关键控制点计划，并在国际空间站“拉达”植物栽培舱进行了测试，以最大程度减少食用在轨生产蔬菜的风险。根据需求研发的食品级消毒巾“普洛桑”，可将蔬菜中 99% 的微生物清除，非常符合 NASA 相关标准要求。

五、空间食用作物栽培研究的发展方向与挑战

空间食用作物栽培的最终目的是作为生物再生生命保障系统的一个功能部分，为未来火星、月球等前哨基地及太阳系内的其

他深空探测载人任务提供食物、氧气、水循环利用、二氧化碳清除等保障，这个目标需要一步一步实现，未来还需要进行更多研究。

(一) 空间植物栽培舱研发

早期的植物栽培舱只是关注如何使植物能在空间栽培、开花和结实，当这个里程碑实现后，后续则需要同时考虑植物基础研究和食物生产种植研究，这两者在较大规模生物再生生保系统发展中都是不可或缺和相辅相成的，但这两种舱的设计要求不同。由于空间环境对植物生长和繁殖的长期影响仍然了解得不是很多，这可能会影响到植物作为再生生保系统中食物来源的角色和作用，今后用于研究的植物生长舱要具备开展整体性研究植物生长发育的实验能力，而且今后的整体性研究不仅要通过拟南芥这样的模式生物，更要直接关注粮食作物的种植，尤其是要将所有实验的关注点放在空间食物可持续生产的总体目标上。关于在微重力和低重力环境下大型食物生产系统的技术和知识，仍然是空白，因为只有小型植物生产系统被带入了轨道。

(二) 矮化作物选育

由于航天器或星际舱内的可利用空间非常有限，促使人们向小型、收获指数高的作物种类方向选择，对于未来长期航天飞行任务而言，采用遗传工程植物，培育专门适应受限空间和航天飞行环境的品种是一种解决方案，目前这项工作正在进行。

(三) 重要参数观察

在空间种植植物生产食物的一个管理要点是能够预测植物的产量以及精确控制植物在航天器环境中的生长发育，而生物再生生命保障系统与现有农艺模型的主要区别在于植物是生长在一个受控的环境中，环境参数只要略有差异，就会严重影响到整个系统，因为它没有像大气、海洋或土壤那样的缓冲器作用。要想获得一个可靠的基于较高等植物的生命保障系统，必须充分了解植

物在空间环境条件下的生长机制，精确预测生物过程，为了获得这些知识，需要研发基于空间环境(即重力减少、高辐射、磁场发生变化、低压)下的植物生长机理模型，并对一些与植物物质代谢和能量平衡有关的参数进行观察和局部测定来获得验证。

(四) 其他

植物在空间生长的光照问题已经取得了非常大的进步，但靠电力照明所产生的能源负担仍然是大规模植物生产的一个限制性因素。关于植物在重力减少环境下的气体交换仍然有许多工作要做，尤其是在较大生长舱内种植时的情况。

六、结语

迄今为止，所有空间植物种植舱实验都是基于低地球轨道航天器内的物化生命保障系统，而对于未来的深空探测长期任务，生物再生生命保障系统途径则被认为是最佳保障策略，高等植物种植尤其是食用作物生产将是这个保障系统至关重要的功能部分，对于这个目标，仍然有很多知识和技术方面的空白，未来还有大量工作需要付出艰辛的努力。

(中国航天员科研训练中心)