

DOI:10.11918/202307051

# 空间植物栽培装置方案与验证

唐永康<sup>1</sup>, 蔡旭哲<sup>2</sup>, 吴浩<sup>2</sup>, 吴志强<sup>1</sup>, 艾为党<sup>2</sup>, 沈韫贻<sup>2</sup>, 毛瑞鑫<sup>2</sup>, 胡清华<sup>2</sup>, 王隆基<sup>2</sup>

(1. 人因工程全国重点实验室(中国航天员科研训练中心), 北京 100094; 2. 中国航天员科研训练中心, 北京 100094)

**摘要:** 为满足空间植物培养的需求, 基于空间微重力环境和平台资源约束, 开展了根部水分和养分控制、栽培室大气环境控制、光环境控制等方面的空间植物栽培装置方案研究。研制了具有水分/养分供应、大气环境控制、光源、测量与控制、栽培室和根盘等6个功能模块的空间植物栽培装置。开展了装置的集成与调试, 对装置各功能模块设计合理性进行验证。最后利用组合体试验平台, 进行装置各功能模块集成性能验证、植物功能评价验证(生物学特性、物质和能量交换、营养品质和生物安全性等)及植物栽培流程验证(流程合理性、资源需求及保障、与环境之间的相互影响)。验证结果表明: 水分供应、养分供应、大气环境控制、植物光照控制和参数测量控制等性能良好, 能够满足植物培养对各类生长环境条件的需求; 生菜生长旺盛, 生产效率  $101.31 \text{ g(鲜质量)} \cdot (\text{kWh})^{-1} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ , 光能利用率  $0.31 \text{ g(干质量)} \cdot \text{mol}^{-1}$  光子, 富含各种营养, 食用安全。装置方案和植物栽培流程合理可行, 性能良好, 具有较高的植物生产能力。研究结果为后续开展空间植物栽培装置研制奠定了技术基础。

**关键词:** 空间; 植物; 栽培; 装置; 方案

中图分类号: V419

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)04-0158-07

## Scenario and verification of a space plant cultivation facility

TANG Yongkang<sup>1</sup>, CAI Xuzhe<sup>2</sup>, WU Hao<sup>2</sup>, WU Zhiqiang<sup>1</sup>, AI Weidang<sup>2</sup>, SHEN Yunze<sup>2</sup>, MAO Ruixin<sup>2</sup>, HU Qinghua<sup>2</sup>, WANG Longji<sup>2</sup>

(1. National Key Laboratory of Human Factors Engineering (China Astronaut Research and Training Center), Beijing 100094, China; 2. China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China)

**Abstract:** To satisfy the needs of plant cultivation in space, the scenario of a space plant cultivation facility (SPCF) was conducted, based on the limited resources and microgravity in space environments. The study contents included water and nutrient control around roots, atmospheric environment control in cultivation room, and light environment control, etc. The facility was designed with six functional modules, consisting of water and nutrient supply module, atmospheric environmental control module, light module, measurement and control module, cultivation room module, and root tray module. The integration and testing of the facility were carried out and the rationality of the design of each functional module was verified. Finally, the combination testing platform was used to verify the integrated performances of various functional modules of the facility, evaluate plant functions (biological characteristics, material and energy exchange, nutritional quality, and biosafety), and verify plants cultivation processes (process rationality, resource requirements and supply, and mutual impact with the environment). The verification results indicated that the performance of water supply, nutrient supply, atmospheric environmental control, illumination control, as well as the measurement and control is well, meeting the demands of plant growth in space. Lettuce grow vigorously with a production efficiency of  $101.31 \text{ g (fresh weight)} \cdot (\text{kWh})^{-1} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  and a light energy utilization rate of  $0.31 \text{ g (dry weight)} \cdot \text{mol}^{-1}$  photons. More importantly, the lettuce is nutrient rich and safe for consumption. The scenario of facility design and cultivation procedures are reasonable and feasible with good performance and high production capacity. This study establishes technical foundations for the future development of plant cultivation facility targeting space environments.

**Keywords:** space; plant; cultivation; facility; scenario

植物是受控生态生保系统(controlled ecological life support system, CELSS)中非常关键的生物功能部件, 通过植物的光合作用和蒸腾作用, 可以为航天

员提供食物、O<sub>2</sub>和净水, 同时去除CO<sub>2</sub>和一些微量有害气体, 并能缓解航天员的心理压力<sup>[1]</sup>。因此, 在特定人工环境(如空间站)中研究植物的生理生态

收稿日期: 2023-07-18; 录用日期: 2023-09-11; 网络首发日期: 2024-03-18

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240318.1057.005>

基金项目: 人因工程全国重点实验室基金(GJSD18001, 6142222210701)

作者简介: 唐永康(1974—), 男, 博士, 副研究员; 吴志强(1970—), 男, 博士, 研究员

通信作者: 吴志强, wzqacc@126.com

特性,对于未来在月球或火星基地建立 CELSS 有着重要的意义<sup>[2]</sup>。

1971年,俄罗斯利用礼炮号空间站开展了“绿洲”1号植物栽培系统搭载实验,从此开启了人类在空间进行植物培养和研究的的大门。美国、俄罗斯等航天大国多次在礼炮号空间站、和平号空间站、航天飞机和国际空间站上,开展植物培养的各类实验研究。它们先后在太空利用24台植物栽培系统,栽培了40多种不同种类的植物<sup>[3-5]</sup>。目前,蔬菜生产系统(veggie)、先进植物栽培装置(APH)和根曝露在轨测试系统(XROOTS)正在国际空间站开展相关实验研究,已培养了中国大白菜、生菜、拟南芥、小麦和萝卜等植物<sup>[6-12]</sup>。国内方面,中国航天员中心和中科院,在天宫二号和中国空间站上搭载了植物实验装置,开展了生菜、水稻和拟南芥等植物培养<sup>[13-14]</sup>。此外,相关研究单位也在地面开展了针对空间环境条件下的植物栽培研究工作<sup>[15-20]</sup>。

总体而言,国外航天机构开展的研究和实际飞行实验较多,空间站植物栽培系统的设计也越来越复杂,开展的研究内容和方向越来越多。科学家们在广泛开展空间微重力环境对植物生长特性、遗传特性、生理特性等方面研究的基础上,还开展了食用安全性评价、植物栽培技术评价等方面的研究,并实现了航天员在轨食用培养的生菜<sup>[3,7-8]</sup>。而中国相关研究起步较晚,与国外相比,开展空间搭载植物装置的机会较少,主要差距体现在:1)植物水分和养分供应方式比较简单,不能满足开展植物长期培养的需求;2)装置大气环境控制能力较弱;3)装置可测环境参数和植物生长参数数量较少;4)植物培养面积小,周期较短,植物品种少,实验规模小。

本文是基于空间环境和平台资源约束,开展空间植物栽培装置方案研究和实验验证,掌握水分/养分供应技术和装置集成技术,为后续开展空间植物栽培装置工程样机研制奠定技术基础。

## 1 装置方案设计

### 1.1 系统构成

基于空间微重力环境、资源约束和边界约束,以及满足植物生长所需要的水分、养分、氧气、光照、大气等环境条件,对空间植物栽培装置进行了模块化设计。该装置主要包括水分/养分供应、大气环境控制、光源、测量与控制、栽培室和根盘等6个功能模块(如图1所示),利用支撑结构将6个模块有机集成一个整体。装置包络尺寸为502 mm × 440 mm × 600 mm,质量 ≤ 40 kg,功耗 ≤ 200 W,栽培面积 0.12 m<sup>2</sup>,栽培高度 350 mm。

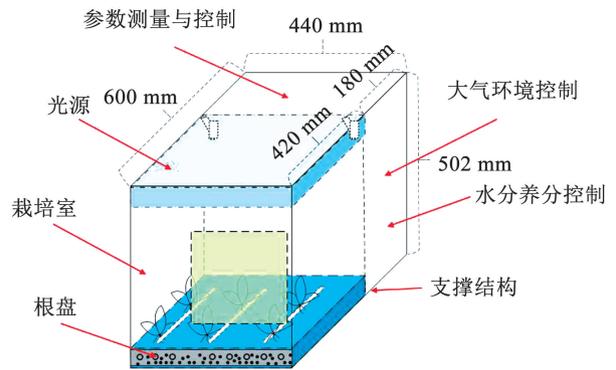


图1 空间植物栽培装置基本构成

Fig. 1 Composition diagram of space plant cultivation device

### 1.2 水分/养分供应

水分/养分供应模块主要功能是根据不同植物生长需要,实时适量为根系提供水分、养分和氧气供应。空间微重力会造成植物根系周围形成一个边界层,如果植物根部水分运动控制不好,极易造成根部水分过多而根系缺氧,或者水分过少造成植物缺水。因此,水分供应拟采用多孔管+吸水材料+栽培基质<sup>[15-16]</sup>的主动供水方式(如图2所示),通过毛细作用为植物基质和根系供水。供水量可定量测量、调节和控制,养分供应采用专门研制的长效控释肥(全营养成分)作为植物养分来源,结合水分供应,可一次施肥为植物整个生育期生长提供充足养分,保证其营养品质。控释肥配方中N为15%,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>为7%,K<sub>2</sub>O为21%,CaO为3%,MgO为2%,S为1%,TE为0.45%。在植物生长期间,主要通过传感器监测栽培基质的电导率变化情况来判断基质养分状况;氧气供应采用气泵、单向阀和气管的方式为栽培基质供应栽培室内的大气(氧气)。

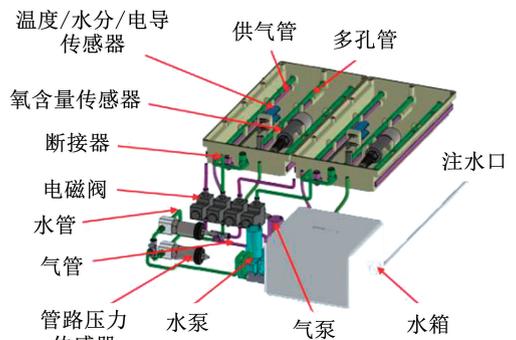


图2 水分/养分供应模块组成

Fig. 2 Composition diagram of water and nutrient control module

### 1.3 大气环境控制

微重力会导致植物叶面周围的边界层显著加厚,导致植物与环境之间的物质(氧气、水和二氧化

碳等)和热量传输受到极大限制。因此,大气环境控制模块拟通过内、外两种通风循环模式为植物生长提供通风条件,以及调节栽培室大气环境参数(压力、温度、湿度、二氧化碳和氧气)。内循环(如图 3(a)所示)为顺时针闭环持续通风,可充分混匀栽培室内大气成分,减少在空间微重力环境下植物与环境间的边界层厚度,促进植物与环境间物质和能量的交换。同时通过乙烯去除剂去除植物产生的乙烯;外循环(如图 3(b)所示)主要基于大气环境参数控制,通过间断方式进行内外气体交换,调节栽培室大气环境条件。

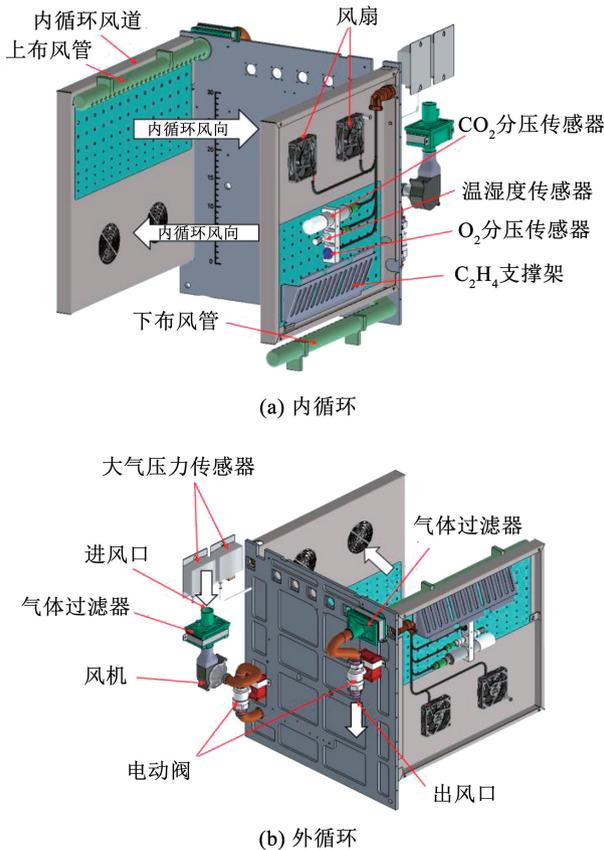


图 3 大气环境控制模块内循环及外循环组成

Fig. 3 Composition diagram of atmospheric environment control module inner loop and extrinsic cycle

1.4 光源

光源模块主要为不同类植物生长提供合理的光质、光强和光周期。基于前期研究结果<sup>[17-18]</sup>,采用红光(660 nm),蓝光(450 nm),绿光(525 nm),白光(400 ~ 700 nm),远红外光(735 nm)共 5 种 LED 光源,其光能占比中红光为 30 ~ 40%,蓝光为 10 ~ 20%,绿光约 5%,白光为 30 ~ 40%,远红外光约 5%。最大光强为  $638.18 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。5 种 LED 光源的光强可以在 0 ~ 100% 之间连续可调,并通过不同颜色 LED 的组合,从而满足果蔬类(如生菜)和粮油类(如小麦)对特定光谱的需求。

1.5 测量与控制

测量与控制模块主要功能是测量、显示和控制各类环境参数值,并根据要求将其控制在合理范围内。其依托测控软件、电源、摄像头和各类传感器(23 支)对满足植物生长的大气环境类、光环境类、根环境类、植物生长状态类共 39 个环境参数和设备运行参数进行有效测量和控制。同时,通过 1553B 总线接口传输装置的控制指令、注入数据和遥测参数,通过以太网传输装置的实验数据。

1.6 栽培室和根盘

栽培室及根盘模块主要功能是为植株和根系提供充足的生长空间。栽培室(如图 4(a)所示)是一

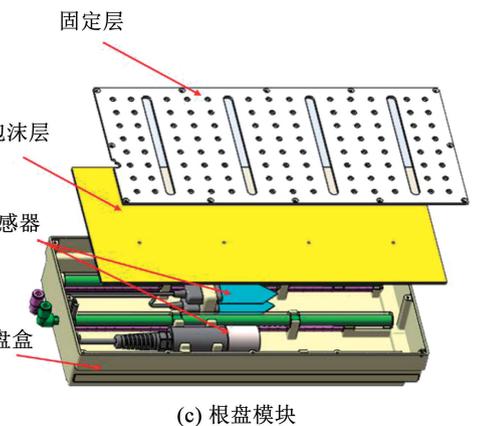
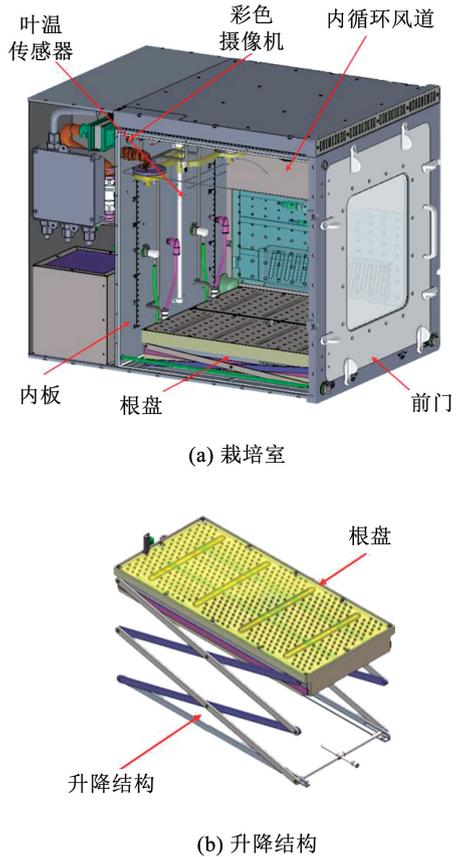


图 4 栽培室、升降结构及根盘模块组成

Fig. 4 Composition diagram of cultivation room module, lifting structure and root tray module

个密闭空间,可开展植物光合作用、蒸腾作用和呼吸作用测试,同时也可维持相对稳定的大气环境条件,防止装置外污染物进入栽培室。栽培室提供栽培面积 $0.12\text{ m}^2$ ,栽培高度 $350\text{ mm}$ ;根盘模块(如图4(b)、4(c)所示)主要包含两个相对独立的根盘,分别安装在栽培室底部左、右两侧,可从栽培室前门整体移除和替换。每个根盘底部连接有升降结构,以近光培养充分利用光能,升降范围为 $0\sim 300\text{ mm}$ 。根盘内优选配置了适合空间水分/养分供应和植物根系生长的栽培基质,栽培基质粒径 $0.5\sim 2.0\text{ mm}$ ,容重 $0.62\text{ g/cm}^3$ ,总孔隙度 $71.80\%$ 。

### 1.7 集成与调试

设计方案确定后,开展了装置中6个功能模块的工程实现和集成装配,重点实现装置的小型化、轻量化和高可靠。随后完成了相关性能调试与改进,主要包括大气漏率测试、水分/养分供应、大气环境控制(气体成分控制、散热能力评估和通风流场测试等)、光源强度和均匀性测量及调节,各类参数的测量与控制,以及功耗测试等内容。通过装置整体集成、性能调试和性能改进,完成的空间植物栽培装置如图5所示。装置主要性能指标实现情况如下:质量 $39.4\text{ kg}$ ,包络尺寸 $502\text{ mm}\times 440\text{ mm}\times 600\text{ mm}$ ,功耗 $166.6\text{ W}$ (峰值),栽培面积 $0.12\text{ m}^2$ 。



图5 空间植物栽培装置

Fig.5 Physical drawing of SPCF

## 2 装置验证

装置验证主要包括:1)装置性能验证(水分/养分供应、大气环境控制、LED光照、参数测量与控制);2)植物功能评价验证(生物学特性、物质和能量交换、营养品质和生物安全性);3)植物栽培流程验证(流程合理性、资源需求及保障、与环境之间的相互影响)。

### 2.1 验证平台

开展装置验证的组合适验平台如图6所示。该平台通过非再生和再生生保系统匹配协调共同实

现环控生保系统功能。其中再生生保系统是平台供氧、大气净化、水净化和回收的主要设备,实现人与环境间物质交换和回收的重要功能;非再生生保系统提供基础平台功能和应急状态下生命保障功能。该平台的大气环境条件包括:1)舱内总压为 $93\sim 97\text{ kPa}$ ;2)氧分压为 $20.5\sim 22.0\text{ kPa}$ ;3) $\text{CO}_2$ 分压为 $0.30\sim 0.50\text{ kPa}$ (平均值约 $0.35\text{ kPa}$ );4)温度为 $23\sim 25\text{ }^\circ\text{C}$ ;5)湿度为 $40\%\sim 60\%$ 。



(a) 组合体试验平台



(b) 植物栽培装置舱内安装位置

图6 组合体试验平台及植物栽培装置舱内安装位置

Fig.6 Combination testing platform and installation position of SPCF

### 2.2 验证过程

将研制完成的空间植物栽培装置安装在平台内(如图6(b)所示),设置装置的初始技术状态(基质装填、控释肥施用、根盘安装、初始水分注入、光源设置、大气参数设置,等等),播种生菜(大速生)种子,启动装置开始验证。验证期间需人工进行必要的植物生长管理、植物收获、样品采集和分析测试。

### 2.3 栽培流程

植物栽培流程验证包括种子播种、水分加注、种子萌发管理、幼苗间苗、植株定植、生长管理、生长测试、收获采样和分析测试等过程。栽培流程如下:

1)种子播种。每个根盘播种8穴,每穴10粒种子,播种深度 $1\text{ cm}$ 。

2)水分加注。将根盘安装在栽培室,连接供水/通气管路,自动供水 $1\ 400\text{ mL}$ 。

3)种子萌发管理。种子吸水萌发( $3\sim 5\text{ d}$ )。

播种后第 4~10 d,开启 50%生菜 LED 光源。

4) 间苗定植。播种第 10 d,选取均匀一致的幼苗间苗/定植 1 株/穴至成熟收获。

5) 生长管理。主要包括光照强度调节、根盘高度调节、水分供应、生长监测、气体交换测试、收获、采样、分析测试。

6) 操作时长。32 d 实验期间,实验人员平均进舱操作时长为 8.16 min/1 人次/d。

验证实验结果表明,植物栽培流程合理可行。

## 2.4 装置性能

1) 水分供应。生长期,水泵供水共 32 次,累计添加量为 15.92 L(不含初始添加 1.4 L/盘)。生菜总耗水为 18.72 L,其中蒸腾 15.14 L。水分供应功能正常。

2) 养分供应。两个根盘共施用生菜控释肥 36.0 g,分两层施用,上层 60%,下层 40%。验证实验期间,不同阶段生菜生长良好,无营养缺乏症状。所测量的基质电导率参数值范围为 0.38~1.58 mS·cm<sup>-1</sup>。

3) 大气环境控制。通过内循环通风,栽培室内通风流场整体均值可达 0.62 m/s,不同截面风速均大于 0.5 m/s,平均极差均小于 0.3 m/s,风速大小及均匀性均能满足要求。通过外循环通风,很好调节了栽培室内大气环境参数值。平均 10~15 min,开启一次外循环,持续 2~10 min 后大气平衡。大气温度控制在 23.0~25.5 °C 范围内。

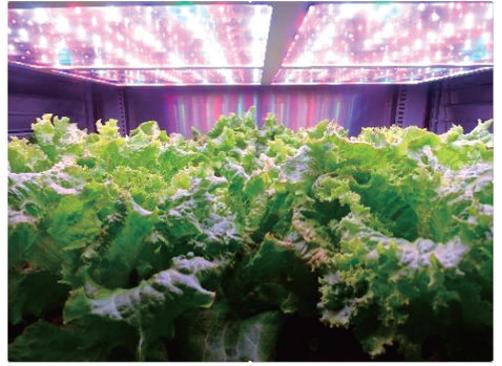
4) 植物光照控制。光源模块所配置红、蓝、白、绿、远红外光 5 种 LED 的发光强度均可以在 0%~100% 之间调节,且可任意组合。验证实验期间,生菜不同阶段所需的光照配置为:萌发阶段中红光为 15%,蓝光为 16%,白光为 10%;生长阶段中红光为 30%,蓝光为 32%,白光为 18%,绿光为 31%,远红外光为 15%。

5) 参数测量控制。植物装置测量的实验参数和设备参数共 39 个。采取循环检测的方式,每 40 s 完成一轮参数的检测和存储。植物装置具备在线影像记录功能,实时监控植物的生长状态。植物装置对参数的测量与控制满足了装置的正常运行和植物的正常生长。

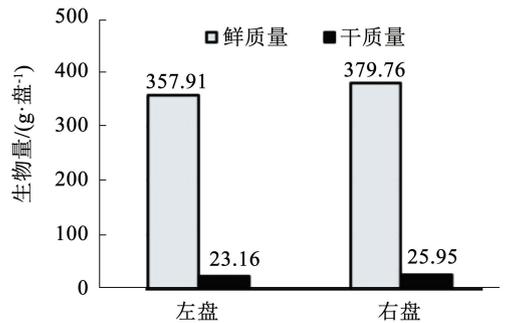
## 2.5 植物生长验证

### 2.5.1 生长特性及生产能力

播种第 3 d 生菜开始萌发,第 10 d 定植,第 32 d 成熟。成熟时生菜叶色浓绿(如图 7 所示),生长旺盛,均匀一致,营养状况良好。生菜株高 22.6 cm,叶片数 9.0 片,生长速率为 0.67 cm/d。生菜共累计总生物量 752.09 g(鲜质量)(如图 7 所示),生长速率为 164.66 g(鲜质量)·m<sup>2</sup>·d<sup>-1</sup>。



(a) 生长状态



(b) 生物量

图 7 生菜收获时的生长状态及生物量

Fig. 7 Growth state and biomass of lettuce plants

### 2.5.2 物质和能量交换

验证实验共耗电 53.03 kWh(见表 1),功率较大的设备主要为 LED 光源功率(24.7 W)、测控模块(24.8 W)和循环风机(11.0 W),整个装置平均功率为 70.0 W(峰值功率为 80.8 W)。共装填干基质 3 866.27 g,总耗水为 18.72 L。验证期间大气二氧化碳平均浓度为 0.4%。收获时生菜叶片的平均光合速率达到 8.47 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>(如图 8 所示)。通过植物光合作用速率测量和计算,生菜整个生长期共吸收二氧化碳 60.56 g,释放氧气 44.04 g。LED 光源通过 5 种颜色 LED 光累积释放可见光光子 162.08 mol,满足了生长对光照的需求。

表 1 验证实验主要物质消耗与产出统计表

Tab. 1 Consumption and output of main materials in closed test

物质消耗/投入	能耗/ kWh	基质/ g	总耗水/ L	养分/ g	CO <sub>2</sub> / g	光子/ mol
	53.03	3 866.27	18.72	36.00	60.56	162.08
物质产出/剩余		O <sub>2</sub> / g	蒸腾 水量/ L	生菜 含水/ L	基质 含水/ L	肥料剩余 养分/g
	752.09	44.04	15.14	0.70	2.88	8.61

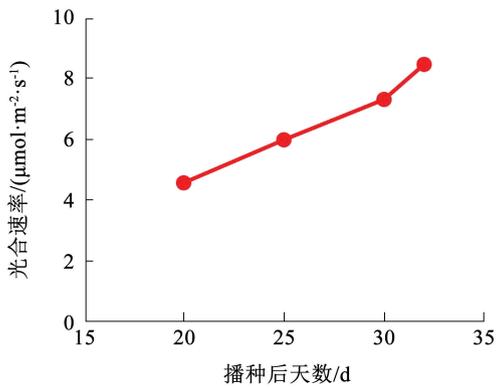


图8 不同时间生菜光合速率

Fig. 8 Photosynthetic rate of lettuce plants at different time

### 2.5.3 生产效率

单位时间、单位面积和单位能量(每天)的物质生产效率为  $101.31 \text{ g(鲜质量)} \cdot (\text{kWh})^{-1} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  (见表2)。基于生菜生物量、LED光源在生菜生长期发射的光子数( $162.08 \text{ mol}$ 光子),计算生菜对光能的利用效率为  $0.31 \text{ g(干质量)} \cdot \text{mol}^{-1}$ 光子。基于生菜收获时生物量干质量(g)和整个生长期实际消耗的水分(L),计算评价水分利用效率为  $2.71 \text{ g(干质量)} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

表2 验证实验生菜生产/利用效率统计表

Tab. 2 Production and efficiency of lettuce plants in closed test

生产速率/ g(鲜质量)· $\text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$	生产效率/ g(鲜质量)· $(\text{kWh})^{-1} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$	光能利用率/ g(干质量)· $\text{mol}^{-1}$ 光子	水分利用率/ g(干质量)· $\text{L}^{-1}$
167.88	101.31	0.31	2.71

### 2.5.4 养分吸收

验证实验投入控释肥  $36.00 \text{ g}$ (总养分质量分数为  $43.4\%$ ,共  $15.62 \text{ g}$ ),收获后控释肥释放残留  $8.61 \text{ g}$ 。肥料的当季利用率为  $49.97\%$ 。生菜累计吸收矿质养分  $6.57 \text{ g}$ ,粗灰分累计量为  $8.89 \text{ g}$ 。基于当季肥料利用率,共  $4.08 \text{ g}$ 养分(合计肥料量  $9.40 \text{ g}$ )进入基质残留。基质中不同养分的质量分数见表3,该养分可以为下一茬植物生长所利用。

表3 验证实验生菜植株大/中/微量元素吸收量

Tab. 3 Absorption of macro/secondary/trace elements in lettuce plants in closed test

氮	磷	钾	钙	镁	硫	灰分
2.19	0.28	3.35	0.19	0.26	0.25	8.89
铁	锰	铜	锌	硼	钼	氯
0.008 8	0.013 1	0.000 4	0.001 8	0.003 2	0.000 2	0.018 3

### 2.5.5 食品安全性

收获后植株样品中重金属质量分数均较低(见

表4)。硝酸盐质量分数为  $524 \text{ mg/kg}$ ,属于正常范围( $497 \sim 649 \text{ mg/kg}$ ),为蔬菜硝酸盐质量分数分级平均标准二级,可安全食用。基质的微生物总量和细菌均高于生菜植株叶片中的数量(见表5)。生菜植株中的真菌、放线菌和粪大肠杆菌均未检出,而基质中均存在真菌和放线菌,但粪大肠杆菌未检出(见表6)。

表4 验证实验生菜植株重金属质量分数

Tab. 4 Heavy metal contents of lettuce plants in closed test ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

镉	铬	铅	汞	砷	硝酸盐
0.084	0.429	0.201	0.014	0.118	524

表5 验证实验生菜植株微生物数量

Tab. 5 Microbial of lettuce plants in closed test

微生物总量 CFU	细菌 CFU	真菌 CFU	放线菌 CFU	粪大肠菌 CFU
$4.6 \times 10^3$	$4.6 \times 10^3$	未检出	未检出	阴性

表6 验证实验栽培基质微生物数量

Tab. 6 Microbial of substrate in closed test

微生物总量 CFU	细菌 CFU	真菌 CFU	放线菌 CFU	粪大肠菌 CFU
$3.4 \times 10^6$	$3.4 \times 10^6$	$1.4 \times 10^4$	$4.1 \times 10^4$	阴性

## 3 结论

1)空间植物栽培装置系统构成合理,集成度高,功能模块性能良好,创造了满足空间植物培养所需的多类环境条件。

2)利用组合体试验平台,开展了32 d装置综合性集成验证,装置实现了水分和养分精准供应、大气环境合理控制、光照的按需调控和栽培基质的优选配置。

3)装置的植物栽培流程清晰、合理,人员操作便捷、时长短( $8.16 \text{ min}/1 \text{ 人次}/\text{d}$ )。装置具有较高的植物生产能力,所培养的生菜生长良好,生产效率达  $101.31 \text{ g(鲜质量)} \cdot (\text{kWh})^{-1} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

致谢:

感谢因人因工程全国重点实验室基金项目支持(GJSD18001和6142222210701)。

## 参考文献

[1]郭双生. 空间受控生态生命保障技术[M]. 北京: 科学出版社, 2022  
GUO Shuangsheng. Space controlled ecological life support technology[M]. Beijing: Science Press, 2022  
[2]HOEHN A, CLAWSON J, HEYENGA A G, et al. Mass transport in

- a spaceflight plant growth chamber[C]// Proceedings of the 28th International Conference on Environmental Systems (ICES). Danvers, Massachusetts; Society of Automotive Engineering (SAE) International, 2018. DOI: 10.4271/981553
- [3] ZABEL P, BAMSEY M, SCHUBERT D, et al. Review and analysis of over 40 years of space plant growth systems[J]. *Life Sciences in Space Research*, 2016, 10: 1. DOI:10.1016/j.lssr.2016.06.004
- [4] 郭双生, 武艳萍. 空间植物栽培技术研究新进展[J]. *航天医学与医学工程*, 2016, 29(4): 301  
GUO Shuangsheng, WU Yanping. Research progress in space plant growing technique[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2016, 29(4): 301. DOI:10.16289/j.cnki.1002-0837.2016.04.014
- [5] 唐永康, 吴志强, 董文平, 等. 空间植物栽培技术分析 with 思考[J]. *植物生理学报*. 2020, 56(1): 1  
TANG Yongkang, WU Zhiqiang, DONG Wenping, et al. Analysis and review on plant cultivation techniques in space [J]. *Plant Physiology Journal*, 2020, 56(1): 1. DOI:10.13592/j.cnki.ppj.2019.0012
- [6] MASSA G D, WHEELER R M, STUTTE G W, et al. Selection of leafy green vegetable varieties for a pick-and-eat diet supplement on ISS [C]// Proceedings of the 45th International Conference on Environmental Systems (ICES). Bellevue, Washington; Society of Automotive Engineering (SAE) International, 2015
- [7] MORROW R C, RICHTER R C, TELLEZ G. A new plant habitat facility for the iss [C]// Proceedings of the 46th International Conference on Environmental Systems (ICES). Vienna, Austria; Society of Automotive Engineering (SAE) International, 2016
- [8] ZABEL P, BAMSEY M, SCHUBERT D, et al. Review and analysis of plant growth chambers and greenhouse modules for space [C]// Proceedings of the 44th International Conference on Environmental Systems (ICES). Tucson, Arizona; Society of Automotive Engineering (SAE) International, 2014
- [9] BOSCHERI G, FILI T, MARCHITELLI G, et al. PFPU-microgravity precursor food production unit development status [C]// Proceedings of the 51st International Conference on Environmental Systems (ICES). St. Paul, Minnesota; Society of Automotive Engineering (SAE) International, 2022
- [10] BURGNER S E, MITCHELL C, MASSA G, et al. Troubleshooting performance failures of Chinese cabbage for Veggie on the ISS [C]// Proceedings of the 49th International Conference on Environmental Systems (ICES). Boston, Massachusetts; Society of Automotive Engineering (SAE) International, 2019
- [11] KHODADAD C L M, HUMMERICK M E, SPENCER L E, et al. Microbiological and nutritional analysis of lettuce crops grown on the International Space Station[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 199. DOI:10.3389/fpls.2020.00199
- [12] KORDYUM E, HASENSTEIN K H. Plant biology for space exploration—Building on the past, preparing for the future[J]. *Life Sciences in Space Research*, 2021, 29: 1. DOI:10.1016/j.lssr.2021.01.003
- [13] ZHENG Huiqiong. Flowering in space [J]. *Microgravity Science and Technology*, 2018, 30(6): 783. DOI:10.1007/s12217-018-9626-5
- [14] SHEN Yunze, GUO Shuangsheng, ZHAO Pisheng, et al. Research on lettuce growth technology onboard Chinese Tiangong II Spacelab [J]. *Acta Astronautica*, 2018, 144: 97. DOI: 10.1016/j.actaastro.2017.11.007
- [15] 唐永康, 沈韞贻, 艾为党, 等. 不同粒径组合对植物栽培基质容重、孔性和水吸力的影响[J]. *空间科学学报*, 2022, 42(6): 1161  
TANG Yongkang, SHEN Yunze, AI Weidang, et al. Effects of different particle sizes on the bulk density, porosity character, water suction of substrates[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, 42(6): 1161. DOI:10.11728/cjss2022.06.220125009
- [16] TANG Yongkang, SHEN Yunze, FENG Hongqi, et al. Study on primary physicochemical characteristics and nutrient adsorption of four plant cultivation substrates [J]. *Life Sciences in Space Research*, 2023, 36: 78. DOI:10.1016/j.lssr.2022.08.008
- [17] 唐永康, 郭双生, 艾为党, 等. 不同比例红蓝 LED 光照对油菜菜生长发育的影响[J]. *航天医学与医学工程*, 2010, 23(3): 206  
TANG Yongkang, GUO Shuangsheng, AI Weidang, et al. Effects of Red and Blue Light Emitting Diodes (LEDs) on the Growth and Development of Lettuce (var. Youmaicai)[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2010, 23(3): 206. DOI: 10.16289/j.cnki.1002-0837.2010.03.001
- [18] TANG Yongkang, MAO Ruixin, GUO Shuangsheng. Effects of LED spectra on growth, gas exchange, antioxidant activity and nutritional quality of vegetable species[J]. *Life Sciences in Space Research*, 2020, 26: 77. DOI:10.1016/j.lssr.2020.05.002
- [19] 郑慧琼, 魏宁, 陈爱地, 等. 空间密闭系统中高等植物生长发育的研究[J]. *载人航天*, 2007, 13(3): 5  
ZHEN Huiqiong, WEI Ning, CHEN Aidi, et al. Study on the growth and development of higher plants in closed space system[J]. *Manned Spaceflight*, 2007, 13(3): 5. DOI:10.16329/j.cnki.zrht.2007.03.001
- [20] 童广辉, 袁永春, 郑伟波, 等. 空间高等植物培养装置[J]. *空间科学学报*, 2016, 36(4): 557  
TONG Guanghui, YUAN Yongchun, ZHENG Weibo, et al. Facility for higher plant culture on orbit[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2016, 36(4): 557. DOI:10.11728/cjss2016.04.557

(编辑 张红)