

空间微重力下植物栽培水分养分控制研究

景海鹏^{1,2} 陈冬² 赵丕盛² 沈韞贻² 郭双生²

摘要 通过“天宫 2 号”空间实验室搭载的空间植物栽培装置,研究了微重力下植物栽培水分养分控制技术. 针对空间微重力特点,设计了植物栽培水分养分传导结构,并验证了其可行性和合理性. 生菜在空间实验室微重力环境下的顺利萌发、生长发育,证明了水分养分传导结构的合理性和可行性,为后续开展更大规模的空间植物栽培奠定了基础. 通过实验,了解了空间微重力下水分养分的传导和分布规律,为研究空间植物栽培水分养分供应方法和测试方法提供了依据.

关键词 空间植物栽培装置, 微重力, 水分养分控制, 空间实验室

引用格式 景海鹏, 陈冬, 赵丕盛, 沈韞贻, 郭双生. 空间微重力下植物栽培水分养分控制研究. 自动化学报, 2018, 44(10): 1764–1770

DOI 10.16383/j.aas.2018.c180502

Investigation on Water and Nutrition Control of Plant Growth Under Microgravity in Space

JING Hai-Peng^{1,2} CHEN Dong² ZHAO Pi-Sheng² SHEN Yun-Ze² GUO Shuang-Sheng²

Abstract With the help of the space plant growth facility in Chinese Spacelab Tiangong 2, the water and nutrition control technology for plant growth under microgravity environment is investigated. Considering the microgravity environment, a special water and nutrition conduction structure is designed and its feasibility and rationality are proved by the successful germination and growth of lettuce. This test has laid a foundation of larger-scale space plant growth and helped to understand the laws of water and nutrition conduction and distribution under microgravity. This investigation provides a basis for the research on water and nutrition supply and measurement methods in space.

Key words Space plant growth facility, microgravity, water and nutrition control, spacelab

Citation Jing Hai-Peng, Chen Dong, Zhao Pi-Sheng, Shen Yun-Ze, Guo Shuang-Sheng. Investigation on water and nutrition control of plant growth under microgravity in space. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(10): 1764–1770

受控生态生保系统 (Controlled ecological life support system, CELSS) 是载人航天长期驻留任务的必然途径. 该系统能够实现氧气、水和食物的自给自足. 高等植物能够利用光能将二氧化碳和水合成为有机物, 并产生氧气, 同时通过蒸腾作用实现水的净化, 可以保障人在太空中对环境 and 食品的需求, 是受控生态生保系统中的关键生物部件^[1-7]. 空间植物栽培技术研究已有 40 余年的发展历程, 已进行多种植物的空间栽培实验, 重点研究微重力对植物生长发育的影响.

1975 年前苏联就开始了空间植物栽培的探索, 他们尝试在飞船中栽种小麦、洋葱等植物. 20 世纪 90 年代, 俄罗斯和保加利亚联合研制了 SVET 空间

温室, 在和平号空间站进行了长期搭载, 并在其中完成了小麦“从种子到种子”的三代完整生长周期培养. 2002 年, 俄罗斯针对国际空间站研制了一款名为 LADA 的空间温室, 至今已进行了 20 多次空间植物栽培实验, 成功培育了小麦、生菜等植物. 近期俄罗斯研制了新一代 LADA 空间温室, 拟用于多种植物的空间栽培^[8-10].

2014 年, NASA 将 Veggie 空间蔬菜生产系统运送到空间站, 并进行了 Veg-01 实验. 2015 年, 经过 33 天的培养, 三名航天员在空间站收获并品尝了第二批种植的蔬菜—红色长叶莴苣. 2015 年 11 月, NASA 在轨道实验室进行了百日菊培养实验, 并进行了天地对比. 在太空中, 百日菊完成了开花过程, 并于 2016 年 2 月进行了收获^[11-16].

为将前期 CELSS 植物栽培研究成果应用于真正的受控生态生保系统, 必须进行空间植物搭载实验. 航天员中心在空间实验室任务中搭载一台植物栽培装置, 在轨验证植物在空间环境中的栽培技术和生长发育状况.

空间微重力下水分传导特性与地面有很大不同.

收稿日期 2018-07-23 录用日期 2018-08-14
Manuscript received July 23, 2018; accepted August 14, 2018
载人航天基金资助
Supported by Manned Spaceflight Fund
本文责任编辑 辛景民
Recommended by Associate Editor XIN Jing-Min
1. 西安交通大学 西安 710049 2. 中国航天员科研训练中心 北京 100094
1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049 2. China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094

在微重力条件下, 流体行为发生根本变化, 植物周围形成边界层, 导致植物与周围物质交换变得困难. 同时, 在微重力条件下实现栽培基质水分养分的充分供应, 同时保证栽培基质的通气也具有挑战性. 在空间微重力下进行植物光合、蒸腾和呼吸作用效率的测定与评价也具有较大难度. 因此, 微重力下的水分养分控制技术是空间植物栽培的关键. 航天员中心在空间实验室任务中搭载一台植物栽培装置, 以验证空间微重力下植物栽培水分养分的控制技术.

因此, 微重力下的水分养分控制技术是空间植物栽培的关键. 航天员中心在空间实验室任务中搭载一台植物栽培装置, 以验证空间微重力下植物栽培水分养分的控制技术.

1 材料与方法

1.1 实验条件

实验时间为 2016 年 10 月 20 日到 11 月 15 日, 实验地点为天宫二号空间实验室.

空间实验室在轨进行空间植物栽培的同时, 地面同步进行模拟空间实验室大气环境参数的植物栽培对照实验, 实验条件及栽培方法均与天基实验相同, 区别为地基实验为完全重力.

天基实验环境条件控制如表 1 所示, 地基实验条件控制以前一天天基环境参数测量平均值为标准. 播种过程在地面完成, 种子在萌发结构中播种完毕, 随飞行器进入空间.

表 1 实验条件设置
Table 1 Test condition setting

参数类别	参数范围
大气温度	23 °C ± 0.5 °C
大气相对湿度	50 % ± 5 %
大气压力	常压
大气氧浓度	20.9 % ± 0.5 %
大气二氧化碳浓度	0.2 % ~ 0.4 %
植物光照条件	光源为红蓝绿发光二极管 (LED), 红蓝绿三色比例 8 : 1 : 1; 光照周期为 14 hr(亮)/8 hr(暗)
生长周期	29 天

1.2 实验装置

本研究利用自主研发的空间植物栽培装置进行. 空间植物栽培装置的结构如图 1 所示, 装置主要参数如表 2 所示.

1.3 水分控制

1.3.1 水分传导结构

针对空间微重力特点, 在植物栽培盒空间内设计了特殊的水分传导结构和路径, 保证在微重力环

境下水分能够在栽培空间内有效传导, 并供给植物的水分需求. 水分传导结构由栽培箱体、供水管路、栽培基质、导水材料、种子固定结构组成, 具体的结构如图 2 所示.

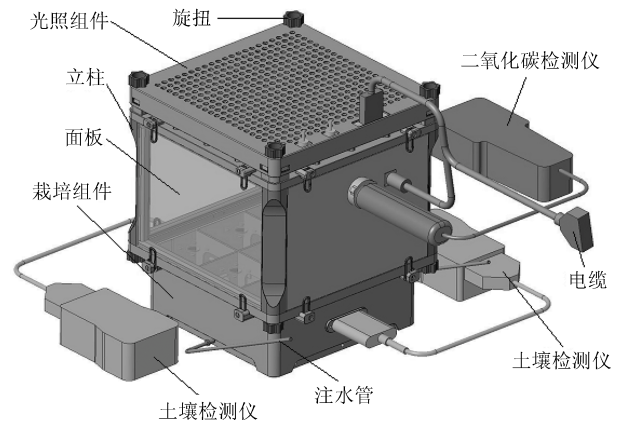


图 1 空间植物栽培装置结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of space plant cultivation device

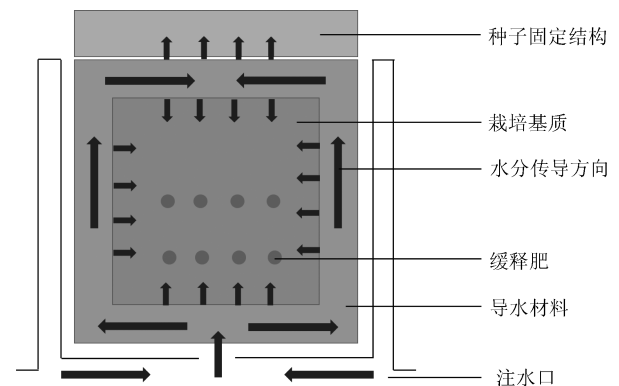


图 2 水分传导结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of water conduction structure

栽培箱体构成水分传导结构的外边界, 在栽培盒底部, 分布着供水管路. 栽培基质作为根系生长介质, 填充在栽培空间内. 在栽培基质中间分布着导水材料构成的导水框架. 栽培基质上方与种子固定结构连接.

1) 栽培箱体

栽培箱体采用 3D 打印制成, 结构采用九宫格设计, 每一格对应一株生菜. 格与格之间由挡板隔开, 使每个格相对独立, 以保证整个栽培结构的稳定性. 挡板中间镂空, 用于格与格之间传导水分, 保持每株生菜基质含水率均匀.

2) 供水管路

供水管路位于栽培箱体底部, 使注入的水分迅速流通至每一个格的下方, 如图 3 所示.

表 2 空间植物栽培装置达到的主要性能指标

Table 2 Main performance indicators of space plant cultivation device

类别	项目名称	主要性能指标
	大小	长方体结构包络尺寸 L(268 mm) × W(268 mm) × H(306 mm)
	重量	5.8 kg (含所有相关配套测试设施及物品)
	功耗	峰值 16.4 W
	栽培单元	1) 栽培面积: 0.045 m ² 2) 可栽培株数: 9 株 3) 栽培基质 + 导水材料: 蛭石 + 棉质纱布 4) 水分管理: 具备加水管路, 栽培盒左右两侧可分别进行栽培基质含水量测量, 测量范围 0~100%, 测量精度 ± 3%. 5) 养分管理: 采用长效缓释肥颗粒进行养分供应, 栽培盒左右两侧可分别进行栽培基质电导率测量, 测量范围 0~300 mS/m, 测量精度 ± 0.3 mS/m. 6) 种子固定结构: 具备 2 个细缝、1 个大圆孔和 2 个小圆孔等三种固定种子的结构形式。 7) 固定盖板: 安装固定在在种子固定结构上, 具有 9 个苗孔; 可方便拆卸。
空间植物栽培装置	光照单元	1) 光源: LED 灯 2) 光质: 红、蓝、绿比例约为 8 : 1 : 1 3) 光强: 光源正下方 5 cm 处平均达到 105 μmol·m ⁻² ·s ⁻¹ . 4) 光源功率: 13.5 W 5) 光周期: 0~24 hrs 手动可调
	生长单元	1) 四面由立柱和透明有机玻璃制成, 立柱具备长、短两种类型, 可方便更换。 2) 在长立柱条件下四周可开放也可密封。
	测量单元	1) 可进行栽培基质中含水量和电导率的手动监测, 含水量测量范围 0~100%, 电导率测量范围 0~300 mS/m。 2) 装置封闭条件下可手动进行大气 CO ₂ 浓度监测, 测量范围 0~5 000 ppm, 分辨率 1 ppm。
	保障单元	具备自主通风组件和 12 V 直流供电电源接口。
	整体设计及接口要求	1) 采取了模块化设计, 可方便拆卸、折叠、绑扎、悬挂或固定。 2) 结构采用了轻质、无毒无害和非易燃的非金属材料。 3) 具有安装机械接口和直流供电电源接口。 4) 具备较好的工效学设计。

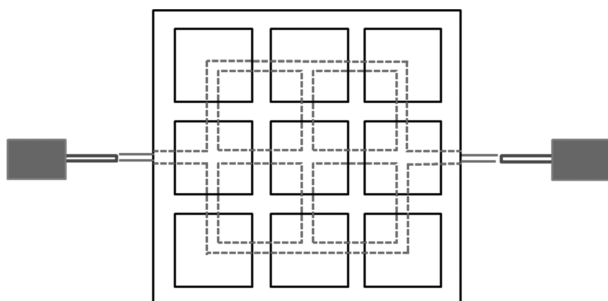


图 3 供水管路结构

Fig. 3 Structure of water supply pipeline

3) 栽培基质

栽培基质是水分传导的最主要载体, 其理化性能直接影响整个结构水分传导的能力. 为保证空间微重力下水分的有效传导, 必须严格筛选栽培基质. 筛选标准包括容重、比重、孔隙率、结构强度、导水

性、持水性、阳离子交换量等理化指标.

4) 导水材料

导水材料为纤维材质, 导水性强, 其作用是在栽培基质中间构建起导水框架, 协助整个栽培空间内的水分传导, 促进水分在整个空间内的均匀分布.

5) 种子固定结构

种子固定结构材质为聚乙烯醇缩甲醛树脂, 位于栽培基质上方, 与栽培基质连接, 从栽培基质中吸取水分, 为种子萌发提供适宜的水分.

聚乙烯醇缩甲醛树脂具有以下特点:

1) 高吸水性和高导水性. 这一特性保证其能够从栽培基质中吸取足够的水分促使种子萌发.

2) 轻质. 这一特性保证其不会增加太多重量, 有利于控制整套装置重量.

3) 干燥时为刚性, 吸水后为柔性. 干燥时为刚性, 保证了在随飞行器上行震荡过程中栽培结构的

稳定; 在轨实验开始后, 通过注水, 使树脂材料变为柔性, 满足种子萌发和扎根需求。

1.3.2 水分传导路径

水分传导路径设计: 1) 纤维导水材料导水速度比蛭石快; 2) 水注入供水管路后, 首先沿着纤维导水材料传导至整个纤维导水框架; 3) 而后水分通过纤维导水材料组成的导水框架渗透至蛭石; 4) 种子固定结构从纤维导水材料吸取水分, 支持种子萌发。

1.3.3 水分测定

水分测定采用土壤多参数分析仪, 其测定原理为频域反射。仪器探头有 3 个探针, 覆盖面积大, 可测定较大基质范围内的含水率。栽培盒两侧各有一个探头插入栽培基质, 用于验证基质含水率的均匀性。每天读取一次含水率数据, 最后绘制成含水率变化曲线, 用于分析整个实验周期内含水率变化规律, 为水分控制技术提供数据支撑。

1.3.4 补水机制

补水机制的确定采用地面确定标准—在轨曲线测定—天地比对—修正的基本方法: 1) 栽培基质种类筛选完毕后, 针对该基质特点, 确定适合植物生长的基质含水率范围。2) 在地基验证实验中, 根据含水率控制范围, 确定补水时间和补水量。3) 在天基实验中, 根据地面确定的补水时间和补水量进行补水。同时每天测定基质含水率。4) 根据含水率数据绘制天基实验含水率曲线, 并与地基验证实验含水率曲线进行比对。

1.4 养分控制

1.4.1 养分供应

养分供应方式: 缓释肥。缓释肥是一种可以持续缓慢释放养分的特殊肥料, 通过硫基树脂等包衣材料控制内部养分释放速率; 针对本次实验, 专门研制了适合生菜生长发育规律的缓释肥, 肥效 30 天, 成分分配比如表 3。

表 3 缓释肥成分配比

Table 3 Ingredient ratio of slow release fertilizer

成分	质量分数 (%)	
氮	NO ₃ -N	9
	NH ₄ -N	11
磷	水溶性 P	6.2
	枸溶性 P	1.8
钾		10
硫		4
钙		2
镁		0.2
铁锰铜锌硼		0.08

缓释肥放置位置为栽培基质中层和下层, 如图 2 所示。

2 结果与分析

2.1 栽培基质水分养分控制情况及分析

2.1.1 栽培基质水分控制情况及分析

由于水分和养分情况对植物生长发育具有重要影响, 因此在研究空间微重力对植物生长发育影响的同时, 必须监测微重力下基质水分养分控制情况, 了解微重力对水分养分传导和分布的影响。整个实验期间, 天基和地基同步对照实验栽培盒基质中水分的动态变化监测情况如图 4 所示。

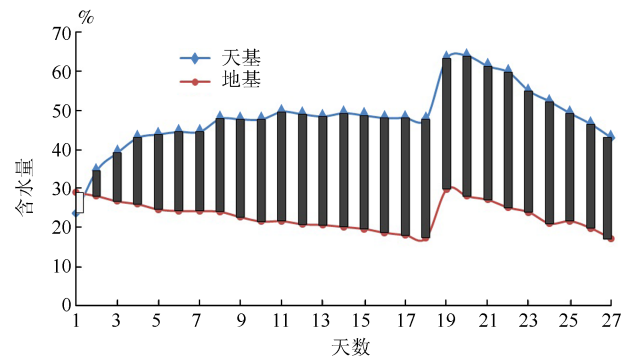


图 4 天基和地基同步对照实验栽培基质含水率变化曲线
Fig. 4 Change curves of moisture content of substrates in space-based and ground-based synchronous controlled trials

从图 4 中可以看出, 实验前期, 天基水分测量值明显高于地基对照测量值, 而且天基与地基的变化趋势相反, 即天基基质水分大约在第 1~10 天期间, 其每天在不断缓慢上升, 之后在约第 11~15 天内基本保持平稳, 再后在约第 16~18 天三天内则开始逐步缓慢下降。在第 18 天补充水分和营养液后, 天基基质含水率测量值较地基急剧上升, 之后则急速下降。由此可以看出, 天基栽培基质水分测量值与地基测量值存在较大差异, 但从第 15 天后开始变化趋势接近, 这在一定程度上能够大致反映水分的变化趋势。1995 年, 美俄科学家在“和平号”空间站利用空间温室-2 联合进行过在轨植物栽培基质含水量测试。其采用的是热脉冲湿度传感器 (Heat pulse moisture sensors), 实验结果表明其天基测量数据也要明显高于地基, 高出约 2.5 倍。该实验的天地栽培基质水分监测差异性原因的分析过程与结果是: 在地面上, 土壤中水分受到重力、吸附力和表面张力 (即毛细管力) 等三种力的作用, 保持土壤水分的力主要是吸附力和表面张力, 而重力主要影响水分进行垂直分布。此时, 当给基质浇水后, 水分由于受到重力作用 (当然同时也受到吸附力和表面张力作用)

而不断下沉,在基质颗粒表面不易形成水膜,因此其含水量测量值会逐渐呈下降趋势.而在天基微重力条件下,由于基质水分失去重力作用,水分运动和分布的主要影响力变为吸附力和表面张力,这两种力会使水分在基质颗粒中缓慢进行同心圆均匀化分布,并在其表面极易形成较厚的一层水膜^[17].

因此,在天基开始浇水后探头周围的水分含量会逐渐上升,过一定时间后会达到水分平衡,之后随着基质蒸发和植株吸收水分等作用导致失水,基质含水量则会逐渐下降.

本实验采用的是频域反射湿度传感器(Frequency-domain reflection moisture sensors),实验所测得基质含水量数据变化情况与上述文献资料报道的情况相似,因此,尽管双方的测量原理不同,但我们认为本次实验其栽培基质水分监测天地差异性的原因与上述文献报道的差异原因分析相同,即本实验利用另外一种测量原理真实反映了天基微重力条件下植物栽培基质中水分的动态传导与分布特征,而非仪器受微重力等影响而测试不准确所致.因此,本次实验研究结果证明,基于频域反射原理的土壤湿度传感器可用于空间微重力条件下的植物栽培基质含水量测试,能够较为精确反映在轨植物栽培基质水分的动态分布特征与规律,而且证明该测试方法对周围环境的电子仪器设备等没有任何干扰或破坏作用(国外担心该方法会对周围仪器设备造成影响而一直未做过尝试),因此,本次实验为今后利用频域反射原理实施空间植物栽培技术水分管理奠定了重要基础.

2.1.2 栽培基质养分控制情况及分析

天基实验与地基同步对照实验的栽培基质电导率均呈现先上升后稳定的趋势,天基实验达到 130 ms/m 左右后趋于稳定,而地基同步对照实验达到 140 ms/m 左右后趋于稳定,即地基略高于天基.这与前期地面 1:1 验证实验的规律一致.实验第 18 天补营养液后,天基和地基同步对照实验的栽培基质电导率均上升,天基测量值略高于地基,之后天基与地基电导率均逐日较快下降,趋势较为一致,如图 5 所示.

整个栽培过程中,天基与地基实验电导率在大部分时间均保持在 100~150 mS/m 水平范围内,吻合度较好.由此可以说明,天基和地基条件下栽培基质的养分释放和传导分布情况相似,因此,基于频域反射原理的土壤水分仪同样能够基本正常测量栽培基质的养分电导率.另外,到目前为止,尚未见有关在轨植物栽培基质电导率监测的文献资料报道,因此,本次在轨植物栽培基质电导率监测技术实验在国际上尚属首次.

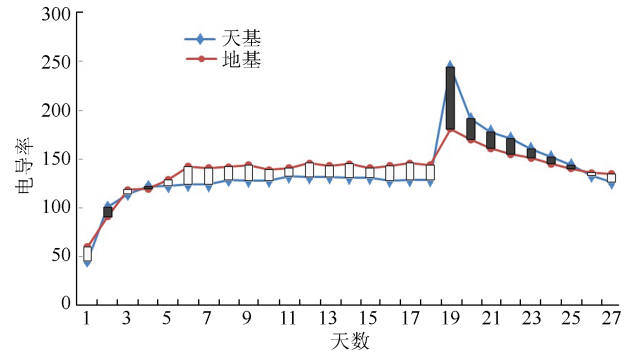


图 5 天基和地基同步对照实验栽培基质电导率变化曲线
Fig. 5 Electrical conductivity curves of space-based and ground-based synchronous controlled culture media

2.2 种子发芽情况

实验结果表明,实验启动后第三天,种子开始萌发.天基实验发芽时间与地基同步对照实验的种子开始发芽时间基本一致.实验结果表明,在三种种子萌发结构中,吸水材料切缝结构发芽率最高,其次为海绵材料发芽结构,丸粒化结构发芽率较低.这与地基同步对照实验的种子发芽率变化趋势是一致的.然而,相比地基同步对照实验,天基实验三种播种方式发芽率均有所下降,具体情况如表 4 所示.

表 4 天基和地基同步对照实验发芽情况统计
Table 4 Germination statistics of space-based and ground-based synchronous controlled trials

实验类别	发芽结构类别	发芽个数/播种个数	发芽率
天基实验	切缝结构	33/99	37%
	圆孔 + 海绵	11/45	24%
	小圆孔 + 大粒化	0/18	0%
地基同步对照实验	拉缝	65/90	72%
	圆孔 + 海绵	29/45	64%
	小圆孔 + 大粒化	5/18	28%

种子在空间微重力下发芽率降低的原因可能有两个: 1) 微重力直接作用于种子萌发过程,导致发芽率降低; 2) 微重力影响了种子萌发的环境条件,间接导致发芽率降低.

在之前进行的空间微重力条件种子萌发实验表明,微重力并不会影响种子的萌发过程^[18-19].因此可以判断,微重力并未直接影响种子萌发过程,而是通过改变种子萌发的环境条件间接降低了发芽率.天地差异可能导致水分传输条件不同而造成发芽效果不同.地基同步对照实验由于重力作用,吸水材料、海绵与种子表皮之间贴合紧实程度较高,水分容易被种子吸收;天基实验在微重力条件下,吸水材料、海绵与种子表皮之间贴合紧实程度没有地面高,因此水分传导不如地基同步对照实验.种子吸水难

易程度的差异导致发芽率不同. 丸粒化结构在天基发芽不理想, 10 粒种子均未发芽. 究其原因是大粒化种子的外表包裹层虽具有纤维导水材料, 但在微重力条件下其与周围接触不好, 阻碍其获取了种子发芽所需的适宜水分.

2.3 植株生长状况及分析

实验期间, 天基实验与地基同步对照实验的植株生长发育均正常, 如图 6 所示.

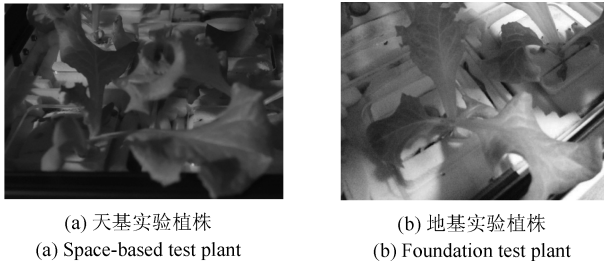


图 6 植株生长状况

Fig. 6 Plant growth condition

天基实验植株基本株型未出现明显异常, 前期相比地基实验叶片显得散乱, 第 27 天时天基与地基整体株型无明显差异. 天基实验茎秆长度大于地基实验, 平均株高高于地基实验. 生长初期天基实验植株发育稍慢于地基实验 (进入三叶期稍晚), 12 天以后天基实验和地基实验平均叶片数无显著差异. 叶片颜色方面, 天基实验植株呈深绿色, 整个叶片从叶片基部到叶片边缘颜色均匀, 无颜色过渡; 地基实验植株呈浅绿色, 叶片基部 (叶柄部分) 近乳白色, 从叶片基部到叶片边缘绿色逐渐加深.

颜色的差异反应的是植株叶绿素含量及分布的差异. 有研究表明, 叶绿体数量及活性受到微重力作用的影响, 数量及活性均有所提高^[20], 这也解释了为什么天基实验植株绿色比地基实验更深. 而颜色均匀性的差异说明, 在微重力条件下, 生菜在地面形成的叶绿素分布规律被打破, 而呈现均匀分布的特点. 这与微重力下物质转运特性有关. 在地面环境下, 植株为了最大限度的提高光合效率, 叶绿素更多的向叶片边缘转运, 而这种机理受到重力调控, 与细胞内重力信号转导受体有关, 因此在微重力下叶绿素分布规律被打破, 呈现均匀分布.

3 结论

通过实验, 验证了微重力下水分养分传导结构的合理性, 了解了空间微重力下水分养分的传导和分布规律, 为研究空间植物栽培水分养分供应方法和测试方法提供了依据. 生菜在空间实验室微重力环境下的顺利萌发、生长发育, 表明了种子萌发结

构、水分养分传导及控制方法的合理性和可行性, 为后续开展更大规模的空间植物栽培奠定了基础.

References

- Salisbury F B. Growing crops for space explorers on the moon, Mars, or in space. *Advances in Space Biology and Medicine*, 1999, **7**: 131–162
- Wheeler R M, Stutte G W, Subbarao G V, Yorio N C. Plant growth and human life support for space travel. *Handbook of Plant and Crop Physiology* (Second Edition). Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2001. 925–942
- Tibbits T W, Alford D K. Controlled ecological life support system: use of higher plants. In: *Proceedings of the NASA Conference Publication 2231*. California, USA: NASA, 1982
- Guo S S, Tang Y K, Gao F, Ai W D, Qin L F. Effects of low pressure and hypoxia on growth and development of wheat. *Acta Astronautica*, 2008, **63**(7–10): 1081–1085
- Tikhomirov A A, Ushakova S A, Kovaleva N P, Lamaze B, Lobo M, Lasseur C. Biological life support systems for a Mars mission planetary base: problems and prospects. *Advances in Space Research*, 2007, **40**(11): 1741–1745
- Nelson M, Dempster W F, Allen J P. Key ecological challenges for closed systems facilities. *Advances in Space Research*, 2013, **52**(1): 86–96
- Halstead T W, Dutcher F R. Plants in space. *Annual Review of Plant Physiology*, 1987, **38**: 317–345
- Ferl R, Wheeler R, Levine H G, Paul A L. Plants in space. *Current Opinion in Plant Biology*, 2002, **5**(3): 258–263
- Wolff S A, Coelho L H, Zabrodina M, Brinckmann E, Kit-tang A I. Plant mineral nutrition, gas exchange and photosynthesis in space: a review. *Advances in Space Research*, 2013, **51**(3): 465–475
- Berkovich Y A, Krivobok N M, Sinyak Y Y, Smolyanina S O, Grigoriev Y I, Romanov S Y, et al. Developing a vitamin greenhouse for the life support system of the international space station and for future interplanetary missions. *Advances in Space Research*, 2004, **34**(7): 1552–1557
- NASA. Meals ready to eat: expedition 44 crew members sample leafy greens grown on space station. 2015
- NASA. Zinnia flowers starting to grow on the international space station. 2015
- NASA. First flower grown in space station's veggie facility. 2016
- NASA. Flowering zinnias on space station set stage for deep-space food crop research. 2016
- Morrow R C, Remiker R W, Mischnick M J, Tuominen L K, Lee M C, Crabb T M. A low equivalent system mass plant growth unit for space exploration. SAE Technical Paper 2005-01-2843, 2005
- Loff S. Zinnia flowers starting to grow on the international space station. 2015
- Bingham G, Jones S B, Podolsky I, Yendler B S. Porous substrate water relations observed during the greenhouse-2 flight experiment. SAE Technical Paper 961547, 1996

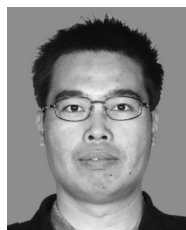
- 18 Fukaki H, Fujisawa H, Tasaka M. How do plant shoots bend up? The initial step to elucidate the molecular mechanisms of shoot gravitropism using *Arabidopsis thaliana*. *Journal of Plant Research*, 1996, **109**(2): 129–137
- 19 Halstead T W, Dutcher F R. Plants in space. *Annual Review of Plant Physiology*, 1987, **38**(1): 317–345
- 20 Zhao Qi, Liu Min, Cai Wei-Ming. Effects of simulated microgravity on the growth of plant seedlings. *Acta Phytobiologica Sinica*, 2000, **26**(3): 201–205
(赵琦, 刘敏, 蔡伟明. 模拟微重力条件对植物幼苗生长的影响. *植物生理学报*, 2000, **26**(3): 201–205)



景海鹏 中国航天员科研训练中心航天员大队航天员. 主要研究方向为航天工程. E-mail: jinghp@126.com
(**JING Hai-Peng** The astronauts of the astronauts brigade in the Chinese Astronaut Research and training center. His main research interest is space engineering.)



陈冬 中国航天员科研训练中心航天员大队航天员. 主要研究方向为航天工程. E-mail: chendong@126.com
(**CHEN Dong** The astronauts of the astronauts brigade in the Chinese Astronaut Research and training center. His main research interest is space engineering.)



赵丕盛 中国航天员科研训练中心研究员. 主要研究方向为环控生保技术. E-mail: zhaops@126.com
(**ZHAO Pi-Sheng** Professor of China Astronaut Research and training center. His main research interest is environmental control and life support technology.)



沈焜曈 中国航天员科研训练中心助理研究员. 主要研究方向为受控生态生保技术. E-mail: feihusyz@126.com
(**SHEN Yun-Ze** Assistant professor of China Astronaut Research and training center. His main research interest is controlled ecological life support technology.)



郭双生 中国航天员科研训练中心研究员. 主要研究方向为受控生态生保技术. 本文通信作者. E-mail: guoshuangsheng@sina.com
(**GUO Shuang-Sheng** Professor of China Astronaut Research and Training Center. His main research interest is controlled ecological life preservation technology. Corresponding author of this paper.)