

赵小强,鹿金颖,陈 瑜,等. 空间植物培养发展现状及其在现代阳台农业中的应用[J]. 江苏农业科学,2020,48(18):54-59.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.18.009

空间植物培养发展现状及其在现代阳台农业中的应用

赵小强,鹿金颖,陈 瑜,周 军

(航天神舟生物科技集团有限公司/北京市空间生物工程技术研究中心/中国航天科技集团有限公司空间
生物工程研究中心/北京市国际科技合作基地,北京 100190)

摘要:阳台农业现代化的发展需要空间技术的应用,国内外空间植物学的研究,已由传统利用空间环境条件进行诱变育种发展到植物生长与人类空间生存一体化的研究阶段。我国利用空间技术已创造出一些农作物、蔬菜和花卉等经济作物的新种质/品种,同时对这些返回地面的材料进行生理生化、生长发育和遗传变异研究。2016 年 9 月我国发射的“天宫二号”携带了拟南芥和水稻上天开展高等植物培养试验,打破了我国在太空培养植物的空白状态,在 2016 年 10 月发射的“神舟十一号”上,航天员景海鹏首次在太空进行人工栽培蔬菜。空间技术在阳台农业植物上的研究具有一定的优势。未来空间植物学的研究,不仅可以提供未来适合在空间环境和现代阳台农业种植的新种质/品种,还可以探索植物在空间生物再生生命保障系统中的作用。

关键词:空间技术;阳台农业;种质资源;再生生命保障系统;智能化

中图分类号:V524.1;S335.2⁺9 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2020)18-0054-06

阳台农业是都市型现代化农业发展的一种形态,是在居室阳台等闲置空间进行的农业活动,它将植物奇特品种、栽培管理、自动化控制和低碳环保等高新技术进行有机结合,其种植植物主要以蔬菜和花卉为主^[1]。微型智能化栽培柜是现阶段阳台农业现代化的一种新的体现形式,它是基于植物工厂的原理和技术而研发的产品,和其他阳台农业一样对栽培的植物具有特定的要求,如蔬菜具有产量高、生长周期短、可食部分比例大、植株矮、营养价值高等特点;花卉具有绿期和花期长、植株矮及抗逆性强等特点。同样,基于空间环境特点(微重力、辐射和磁场等)和条件限制(如狭小、密闭等),空间植物物种须要遵循类似的原则,如体积小,培养技术相对简单;生长快,周期短;产量高,可食部分比例高;抗病和抗逆性强;易于收获、加工和贮藏等。此外,阳台农业和空间植物培养在种植模式和智能化管理方面具有一定的耦合性。因此,利用基于空间特殊环境(如宇宙射线、微重力、高真空和弱地磁场等因素)的太空育种,或与现代生物技术育

种和常规育种技术相结合,培育适合阳台农业或空间环境种植的植物新品种/种质,同时互相参考借鉴种植模式和智能化管理方法,为大力发展我国阳台农业奠定基础,同时为长期留守空间站的航天员的生命活动提供物质保障。2003 年我国第一位宇航员杨利伟登上太空,标志着我国的空间技术进入了一个崭新的发展阶段^[2]。2016 年 9 月我国发射的“天宫二号”携带了拟南芥和水稻上天开展高等植物培养试验,在同年 10 月发射的“神舟十一号”上航天员景海鹏首次在太空进行人工栽培蔬菜,这些事件打破了我国在太空培养植物的空白状态。本研究综述国外空间植物培养的发展现状和国内空间蔬菜和花卉培养现状,并针对空间种植和阳台农业种植的耦合性进行分析和讨论。

1 国外空间植物培养的发展现状

自 1957 年苏联发射第 1 颗人造卫星以来,美国、欧洲、俄罗斯、日本等先后利用往返式卫星、高空气球、空间实验室和空间站等各种空间飞行器,展开了一系列植物的空间研究。主要研究植物在空间的培养装置、生长条件以及空间条件对植物生长发育和遗传变异的影响。

1.1 植物培养装置

为了开展空间植物研究,促进空间植物培养技术的创新及应用,为空间植物相关产业提供技术服

收稿日期:2019-10-30

基金项目:云南省科技重点研发计划(编号:2018IB012)。

作者简介:赵小强(1985—),男,甘肃武山人,博士,工程师,主要从事空间植物育种研究。E-mail:wushan2002zxq@126.com。

通信作者:鹿金颖,博士,研究员,主要从事空间生物学研究。
E-mail:lujinying2001@sina.com。

务,创建空间植物培养装置与环境监控系统显得尤为重要。到目前为止,国际空间站已有多个植物培养设备,如在小企业创新研究计划(small business innovation research program, SBIR)下由美国轨道科学公司和美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)合作开发的商用植物生产系统(biomass production system, BPS)^[3]以及植物处理设备(plant generic bioprocessing apparatus, PGBA)^[4];由日本 5 所大学联合研制的满足微重力条件下植物生长的空间植物箱(space plant box, SPB)^[5-7];美国的先进宇宙培养装置(advanced astroculture apparatus, AAA)^[8]及由美国轨道科学公司研制的新一代空间植物装置——Veggie 蔬菜生产系统。Veggie 蔬菜生产系统有蔬菜种植空间、风箱、光照系统、温湿度、风速和 CO₂ 浓度等控制系统。该系统栽培面积约为 0.1 m² [36.8 cm(宽) × 29.2 cm(深)], 含有 6 个“蔬菜种植空间”, 总质量约为 6.81 kg, 总功率 115 W。每个蔬菜盒子中填充栽培基质、导水材料和养分。栽培基质为烧结黏土, 导水材料为纤维垫, 养分为可控缓释肥。栽培盒底部安装有储水箱, 由航天员定期手动灌溉。利用红、蓝、绿 3 色 LED 灯组合光源进行光照。其上端、下端分别与空间站环控系统和栽培盒相接, 利用金属丝进行支撑以保持灯箱的位置, 高度可调范围 5 ~ 45 cm^[9-10]。此外, Zabel 等对过去 40 年空间植物生长体系进行回顾和分析^[11]。

1.2 遗传育种的研究

航天育种需要较高的要求,国际上开展航天育种研究工作的主要是美国和俄罗斯。近年来,日本、印度等也相继开展了空间植物的研究,已培育了近千种植物,航天育种技术已成为很多国家培育优良新品种和种植材料、创造特色基因资源的有效途径之一^[12]。

1.3 生物学效应的研究

19 世纪 50 年代,俄罗斯就开始研究空间环境对植物生长发育的影响,同时对一些重要的生理生化指标进行测定^[13]。1999—2000 年,Levinskikh 等在空间站内模拟地面环境种植超矮秆小麦,并对其发芽情况、茎长、小穗数和穗粒数等农艺性状进行调查及分析,探讨空间环境对超矮秆小麦生长发育的影响^[14-15];美国科学家将大麦、小麦、大豆等植物在航天飞行器和模拟空间实验室内进行种植观察,发现这些植物在微重力、强辐射和超真空条件下能

正常生长,且有些植物的蛋白质含量得到显著提高^[16]。Shagimardanova 等利用微阵列分析技术对国际空间站种植的大麦种子进行转录组分析,发现在空间环境中超过 500 个基因的 mRNA 水平变化超过 2 倍,这些基因中的应激反应蛋白基因特别是热休克蛋白、致病相关蛋白基因和抗氧化蛋白表现明显,同时超氧化物歧化酶(SOD)在空间的表达是地面的 6 倍,与地面相比,谷氨酰胺转移酶(GST)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)的转录水平分别增加了 24、18、3 倍^[17]。在空间微重力环境条件下,微重力对植物细胞质膜、转录体和蛋白质体、细胞壁和 Ca²⁺ 信号传导有重要影响,但这些细胞并非专门用于重力感知的细胞^[18]。

2 我国空间蔬菜和花卉培养研究现状

我国空间生命科学开始于 20 世纪 60 年代,1987 年利用高空气球搭载甜椒品种龙椒 2 号拉开了太空诱变育种的序幕^[19]。随着我国航天事业的不断发展,截至目前,我国利用卫星和高空气球搭载进行了 300 多项植物材料的试验,搭载的主要目标是进行空间植物育种。此外,研究人员也对空间培养植物装置和植物材料空间生物学效应进行了深入的探讨和研究。

2.1 植物培养装置

建立受控生态生命保障系统是有效解决长期太空载人飞行、载人深空探测及其他星球开发和定居所必需的生命支持手段。为了促进我国空间植物培养技术的发展、创新和应用,我国科学家也进行了大量的研究。2014 年,北京航空航天大学刘红团队建成了“月宫一号”生物再生生保技术集成试验平台,该平台主要由植物舱、乘员舱和资源舱组成,其中植物舱种植面积为 69 m²。试验期间批次培养了小麦、生菜和草莓等 22 种粮食、蔬菜和油料等试验作物^[20]。2016 年 10 月 20 日到 11 月 15 日,我国在“天宫二号”空间实验室搭载了空间植物栽培装置。该系统由栽培单元、光照单元、生长单元、测量单元和保障单元组成,栽培面积为 0.045 m²,可栽培 9 株植物,总质量 5.8 kg,功耗为 16.4 W;栽培基质为蛭石,导水材料为棉质纱布,养分为长效缓释肥。利用红、蓝、绿 3 色 LED 灯组合光源进行光照,光质比例约为 8 : 1 : 1^[21]。这些空间植物栽培装置的不断改进和完善,为我国建立受控生态生命保障系统奠定了坚实的基础。

2.2 遗传育种的研究

通过往返式卫星搭载试验材料,我国已培育了大量的蔬菜和花卉新品种/种质。如通过搭载第 9 颗往返式卫星的甜椒和青椒种子,获得了维生素 C 含量提高了 20%、增产 25% 以上的甜椒新品种宇航 1 号,同时获得具有果型大、早熟、维生素 C 含量高、增产 20% 和抗病虫害等优良性状的青椒新品种卫星 87-2;通过往返式卫星搭载番茄,获得抗病性强、产量可提高 20% 的新品种宇番一号;通过往返式卫星搭载黄瓜,获得果大、风味好、生长势旺盛的新品种航遗 1 号;通过搭载第 20 颗往返式卫星的万寿菊,获得花期长达 9 个月、单层 4 瓣变成多层 6 瓣的新品种太空万寿菊;通过往返式卫星搭载皇后醉蝶花,获得花期长达 8 个月的新品种航选 I、II 号^[22]。2003 年,经“长征二号丁”运载火箭发射第 18 颗返回式卫星搭载的大白菜晚抽薹的品种种子,返回地面后创造了新种质 SP67,并与传统育种方法相结合,获得了株型好、生长势强、耐寒性强和抗病抗逆性强的新品种艳春^[23],同样,经搭载“神州四号”获得的自交系 032-1-2-1-1-H-H 与未搭载的 082-1-1-H-H 杂交育成的新品种杭椒黄帅,其表现为产量高,辣味强,对辣椒疫病、病毒病和白粉病高抗^[24]。除了蔬菜、花卉外,粮食作物、经济作物、药材、林木果树、动物和微生物在航天育种中也获得了一定的成效^[22]。廖雪兰等在搭载“神舟四号”获得凤仙花突变体的基础上对航天诱变凤仙花突变株系进行研究现状的介绍和展望^[25]。

2.3 生物学效应的研究

由于空间特殊的环境条件,当植物经搭载返回地面后其植物种子的萌发率和生长过程受到一定的影响,从而导致生物学效应也发生变化,包括对植物生长发育、植物形态学、植物细胞学、植物生理生化、植物分子生物学等产生影响^[26]。

2.3.1 对植物生长发育的影响 基于空间环境的特殊性,空间环境条件会影响植物的萌发和生长。天水羊角椒和天水牛角椒搭载“神舟三号”飞船进行空间诱变后,天水羊角椒突变体单株结果数较亲本增加 25.3%;天水牛角椒突变体较原始亲本果实变大,单果质量提高 12.7%^[27]。植物种子受太空环境的作用,其发芽率也在发生变化,以金鱼草为材料,经太空诱变后红色金鱼草发芽率降低,黄色金鱼草发芽率基本不变^[28],同时经搭载的草莓^[29],三色堇、东方罂粟、鸡冠花和红花种子等^[30]的萌发

率有所上升,活力提高;而西瓜^[31]、绿花菜^[32]、茄子、萝卜和番茄^[33]种子的发芽率有所下降,种子和幼苗的活力均下降。此外,搭载“神舟八号”的罗汉果,筛选出的航天早熟突变体雌株表现为整个生育期长,果实大、重、早熟,甜苷含量高等优势性状^[34]。由此可见,空间环境对蔬菜和花卉种子的影响前期体现在种子发芽率和幼苗活力方面,且品种差异较大。

2.3.2 对植物形态学产生的影响 太空环境对植物种子的影响会导致植物表型发生变化。搭载“神舟四号”的凤仙花种子,对当代(SP1)的花、果实和种子进行研究发现,花部性状有变化、花瓣数目增多、单株结果实的数目变化大、并出现双果和异型果,同时种子的大小不一致,且每果种子量发生变化^[35]。搭载“神舟八号”的仙来客在花型和花色上出现了明显的变异^[36]。经搭载的金鱼草叶片由矩圆状变为椭圆形,但株高基本没有发生变化^[28]。搭载“实践十号”的金莲花,表现为花瓣层数增多,植株叶片在叶型、叶宽和缺裂等方面都发生了明显的变异^[37]。花卉表型多方面的变异,可满足阳台农业花卉多样性的需求,且有些表型变异通过常规育种难以实现。因此,为了获得更多变异群体,可以通过增加搭载基数来实现此目的。

2.3.3 对植物细胞学产生的影响 由于空间环境的特殊性,会导致细胞结构发生变化,从而导致染色体的变异,最终影响生物体的功能。经搭载“神舟三号”的树莓和搭载“神舟四号”的月季与地面对照相比较,其试管苗叶片性状、叶绿体和线粒体超微结构发生了较大变化,部分细胞的细胞壁变形,叶绿体变大,部分叶绿体片层结构扭曲模糊,大多数叶绿体中淀粉粒明显增加,叶绿体含量基本不变;线粒体数目增加,偶见内嵴消失及外膜破裂的现象^[38-39]。福橘茎尖搭载“实践八号”获得再生植株后,对其进行无性系细胞有丝分裂及细胞超微结构观察发现,航天搭载对福橘茎尖具有诱变作用,有丝过程存在不同程度的异常,同时有些无性系植株叶肉细胞超微结构呈现细胞序性死亡^[40]。

2.3.4 对植物生理生化产生的影响 太空环境可诱发植物生理生化发生变化,对植物体内 SOD、CAT、过氧化物酶(POD)和酯酶等的活性和酶带发生变化。刘敏等对搭载“神舟四号”的月季和地面对照相比较,发现其叶片中 SOD、POD、CAT 3 种保护酶的活性均有增加^[38]。对搭载“神舟七号”的芹菜种子种植后,检测到幼苗 1、2、4 叶的丙二醛

(MDA) 含量增加,可溶性蛋白质含量下降;2、3、4 叶的 SOD、POD、CAT 活性均增强,经搭载的 2 个植株显著高于对照且总干质量极显著高于对照^[41-42]。对搭载“神舟八号”和模拟微重力三维回转器下番茄叶片进行比较,发现航天番茄叶片细胞亚显微结构的变化大于模拟微重力效应处理的叶片细胞亚显微结构,且 SOD 和 POD 活性在 2 种环境下均有明显提高^[43]。

2.3.5 对植物分子生物学产生的影响 特殊的空间环境对当代植株诱变后,发生变异的植株在分子水平上会发生明显的变异。随着对太空诱变研究的深入,空间诱变分子生物学机理研究逐步开展起来。以“神舟四号”搭载的月季组培苗为材料,用 40 个随机引物对空间处理和地面对照叶片 DNA 进行随机扩增多态性 DNA 标记(PAPD)检测,共扩增出 148 条条带,其中 5 个引物表现出多态性,变异程度达 6.34%^[39]。通过对“神舟八号”飞船搭载的仙客来突变株进行 RAPD 试验分析,发现在 28 条随机引物中有 27 条引物扩增出现多态性,总共扩增出 156 条条带,其中 91 条呈现出多态性,多态性比率达到 58.33%。所有突变株的 DNA 分子均发生了显著变化,变异率从 23.08% ~ 33.97% 不等^[36]。

李华盛等利用搭载“神舟八号”的拟南芥幼苗为材料,筛选出在空间环境条件下稳定表达的基因^[44],同时在 3 种不同微重力条件下,利用基因芯片对拟南芥幼苗的基因表达差异进行筛选,发现微重力可以影响一些基因的表达,这些基因参与应激反应的代谢、重力响应、DNA 损伤和修复,从而使植物通过调节代谢途径,使之适应空间环境应激、微重力和辐射^[45]。

3 阳台农业和空间环境植物培养的耦合

通过分析比较阳台农业与空间环境植物培养,可以发现其在种植模式、植物种类、智能化管理方面具有一定的相似之处。

3.1 种植模式

随着社会的进步、技术的发展,我国阳台农业的主要栽培模式由传统的土质栽培逐渐被无土栽培所替代。无土栽培的主要模式有水培、基质培养和气雾栽培。采用无土栽培可以让栽培管理简便化,且有利于保持阳台环境干净整洁。

为了解决阳台空间有限的问题,经过相关科研单位及公司的研究,阳台农业装置已经形成较多的

模式,如梯架式、管道式、壁挂式、立体柱、栽培柜等,目前这些装置模式中具有代表性的是栽培柜,如北京京鹏环球科技股份有限公司研发的智能化绿色蔬菜种植乐园(京鹏智慧菜园)和郑州麦佳农业科技有限公司研发的一种新型智能种菜机(麦佳氧菜源家庭智能种菜机)。这 2 款智能种菜机均采用营养液循环的方式进行蔬菜的批次生产。

在空间环境条件下,各国植物的种植模式大多采用无土栽培的模式,并利用风扇或风箱进行大气温湿度、风速和二氧化碳浓度等控制,利用 LED 灯作为植物生长的光源,以保证植物正常生长。如 20 世纪 90 年代,俄罗斯和保加利亚联合研发的 SVET 温室在和平空间站进行了长期搭载,在 SVET 温室中完成了小麦“从种子到种子”的 3 代完整生长周期培养^[46]。2002 年,俄罗斯针对国际空间站研制了名为 LADA 的空间温室,并进行了 20 多次空间植物栽培试验,成功培育出小麦、生菜等植物^[47-48]。2014 年,NASA 将 Veggie 空间蔬菜生产系统运送到空间站进行生菜试验种植,收获后 3 名宇航员在空间站保留样品带回地面进行分析测试^[9];2015 年 11 月,NASA 首次在轨道实验室进行开花植物百日菊的培养试验,在太空中百日菊完成了开花过程,并于 2016 年 2 月收获^[10]。2009 年,日本宇宙航空研究开发机构(japan aerospace exploration agency, JAXA)将研制的植物试验单元随航天飞机发射到国际空间站的日本试验舱,以拟南芥为研究对象启动“空间种子项目”试验^[49]。我国在“天宫二号”空间实验室搭载的空间植物栽培装置,种植模式采用基质栽培的培养模式^[21]。

3.2 种植植物

基于阳台农业的自身特点,对种植蔬菜和花卉有一定的要求,蔬菜类要求植株生长快、周期短、产量高、可食部分比例高、抗病和抗逆性强等;花卉类要求植株相对矮小、花瓣数增加、花期和绿期长等。随着阳台农业规模的逐渐形成,其育种工作也会逐渐推进,其育种目标主要为表型、品质、产量、抗逆性、观赏性等。同样,基于空间培养条件的限制,如空间狭小和密闭等,在作物选择上遵循阳台农业类似的原则,如植株占用空间小,培养技术相对简单,对环境条件没有特殊要求;易于繁殖和移植,遗传性状稳定;生长快,周期短;产量高,可食部分比例高;抗病和抗逆性强;易于收获、加工和贮藏等。我国利用空间技术已获得一定的成果,如通过搭载第

20 颗往返式卫星的万寿菊,获得花期长达 9 个月、单层 4 瓣变成多层 6 瓣的新品种太空万寿菊;皇后醉蝶花通过往返式卫星的搭载后,获得花期长达 8 个月的新品种航选 I、II 号^[22]。花卉花期的延长和花瓣数的增加,不管在阳台农业还是在空间环境种植方面都具有一定的优势。

3.3 管理智能化

随着农业技术智能化的发展,阳台农业部分种植形式实现了营养液自动循环系统、空气循环系统和人工补光系统等,且实现了在封闭的环境中对植物所受的光照、温/湿度、水分、营养等环境条件进行精确智能调控,使其均达到植物生长的最佳状态,以生产出高品质蔬菜,如上述阳台农业中最新研制的 2 款智能种菜机。同时,由于智能自动化的管理,极大改善了劳动强度和劳动时间。同样由于空间环境的特殊性,在空间种植植物实现自动化管理、一体化、信息化显得尤为重要,这样可以减少宇航员的工作强度。在 2 种不同的种植环境条件下,可根据不同环境自身的特点相互借鉴和完善管理技术。

4 小结与展望

我国利用空间技术获得了大量适合阳台农业种植的蔬菜和花卉新品种,但因种类和数量的局限性,在阳台农业中应用较少。阳台农业是一个方兴未艾的产业,能有效解决城市化进程中人与自然的矛盾、提高城市绿化面积、丰富城市绿化空间的层次等,它的快速发展可达到一种无污染、可循环持续发展的生态农业模式。同时,阳台农业和空间环境植物培养具有一定的耦合性,具体表现在种植模式、植物种类和智能化管理,特别是对栽培植物的选择上。不管是传统的阳台农业还是基于植物工厂的现代化阳台农业,因其种植空间和种植面积的制约,所要求栽培种植的植物一般要具有产量高、生长周期短、可食部分比例大、株型矮小、营养价值高等特点,而这些特性又是空间植物种植具备的重要因素。植物作为生物再生生命保障系统的最重要组成部分,为太空人员提供生命所需的食物、氧气和水。美国肯尼迪航天中心经过多年的试验筛选出一些在植物舱中生长较好的作物品种,如大豆 Hoyt、马铃薯 Norland、菠菜 Nordic IV、番茄 Reimann、草莓 Oso Grabda 等^[50]。空间站以及基地初期所需要的色拉型植物主要利用生菜、油菜和白菜,这 3 种植物均具有株型矮小、营养价值高、可食

部分比例大、生长迅速等特点^[51],而这些植物品种同样也是阳台农业种植中首选的植物品种。随着我国载人航天工程进入空间站阶段,解决航天员长期驻留所需的食物、氧气和水等生存必需品就显得尤为重要。因此,培育适合太空种植的新品种,可以给航天员的生命活动提供物质保障,进而为我国成为空间研究大国奠定基础。

近年来,农业科学与空间科学技术交叉形成的空间农学对我国农业生产发展和农业科学技术产生了重要的影响。人们开展空间植物学的研究,可以探索在空间特殊环境下植物生长发育的规律,并利用空间环境引起的遗传变异,为作物诱变育种创造新的种质,同时为人类开拓空间资源创造条件。

参考文献:

- [1] Singh V P. The entropy theory as a tool for modeling and decision making in environment and water resources[J]. Water SA, 2000, 26(1): 1-12.
- [2] 高文远,贾伟,肖培根. 论空间技术在药用植物研究上的应用[J]. 中国中药杂志, 2004, 29(7): 611-614.
- [3] Morrow R C, Crabb T M. Biomass production system (BPS) plant growth unit[J]. Advances in Space Research, 2000, 26(2): 289-298.
- [4] Hoehn A, Clawson J, Freeman J, et al. Thermal design of a spaceflight plant chamber payload [C]//33rd International Conference on Environmental System, 2003: 1-10.
- [5] Kitaya Y, Tani A, Goto E, et al. Development of a plant growth unit for growing plants over a long-term life cycle under microgravity conditions[J]. Advances in Space Research, 2000, 26(2): 281-288.
- [6] Tani A, Okuma T, Goto E, et al. Ground performance of air conditioning and water recycle system for a space plant box[J]. Advances in Space Research, 2001, 27(9): 1557-1562.
- [7] Kamada M, Omori K, Nishitani K, et al. JAXA space plant research on the ISS with european modular cultivation system[J]. Biological Sciences in Space, 2007, 21(3): 62-66.
- [8] 郭双生,傅岚,艾为党. 国际空间站生命科学实验装置研制与应用进展[J]. 航天医学与医学工程, 2003, 16(6): 459-462.
- [9] Morrow R C, Remiker R W, Mischnick M J, et al. A low equivalent system mass plant growth unit for space exploration[C]//Proceeding of the 35th International Conference on Environmental Systems, 2005: 1-7.
- [10] 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): 301-306.
- [11] Zabel P, Bamsey M, Schubert D, et al. Review and analysis of over 40 years of space plant growth systems[J]. Life Science in Space Research, 2016, 10: 1-16.
- [12] FAO, IAEA. India: mutant variety database [DB/OL]. (2018-06-25) [2018-07-27]. <https://mvd.iaea.org/>.
- [13] Khvostova V V, Gostimskii S A, Mozhayeva V S. Further study of the

- influence of space flight environment on the chromosomes of primary embryo roots in pea and wheat[J]. Planetary and Space Science, 1964, 12(11):186–191.
- [14] Levinskikh M A, Sychev V N, Derendiaeva T A, et al. The influence of space flight factors on the growth and development of super dwarf wheat cultivated in greenhouse Svet[J]. Aerospace and Environmental Medicine, 1999, 33(2):37–41.
- [15] Levinskikh M A, Sychev V N, Derendyaeva T A, et al. Analysis of the spaceflight effects on growth and development of super dwarf wheat growth on the space station mir[J]. Journal of Plant Physiology, 2000, 156(4):522–529.
- [16] Halstead T W, Dutcher F R. Plants in space[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1987, 38(1):317–345.
- [17] Shagimardanova E I, Gusev O A, Sychev V N, et al. Expression of stress response genes in barley hordeum vulgare in a spaceflight environment[J]. Molecular Biology, 2010, 44(5):734–740.
- [18] Kordyum E L, Chapman D K. Plants and microgravity: patterns of microgravity effects at the cellular and molecular levels[J]. Cytology and Genetics, 2017, 51(2):108–116.
- [19] 李 谨, 耿金鹏, 曹天光, 等. 太空诱变育种的研究进展[J]. 北方园艺, 2015(14):189–193.
- [20] 郭双生, 吴志强, 高峰, 等. 中国受控生态生保技术研究进展与展望[J]. 载人航天, 2016, 22(3):269–280.
- [21] 景海鹏, 陈 冬, 赵丕盛, 等. 空间微重力下植物栽培水分养分控制研究[J]. 自动化学报, 2018, 44(10):1764–1770.
- [22] 张占路, 卢运明, 李京生. 我国航天育种产业化现状[J]. 卫星应用, 2011(5):8–15.
- [23] 李晓锋, 朱红芳, 朱玉英, 等. 空间诱变创制不结球白菜晚抽薹新种质及新品种艳春的选育[J]. 核农学报, 2018, 32(7):1249–1255.
- [24] Zhang H B, Luo A Y, Zhang J D, et al. Breeding of an F_1 hybrid cultivar hangjiao huangshuai by Space mutation breeding technique[J]. Agricultural Science & Technology, 2016, 17(6):1363–1366.
- [25] 廖雪兰, 文国琴, 廖 科, 等. 航天诱变凤仙花突变株系研究现状与展望[J]. 分子植物育种, 2017, 15(5):1945–1950.
- [26] 赵 辉. 空间诱变在航天工程育种中的研究与应用[J]. 卫星应用, 2018(1):43–47.
- [27] 鹿金颖, 韩新运, 梁 芳, 等. 空间诱变育成辣椒新杂交种航椒 6 号及其 RAPD 分析[J]. 核农学报, 2008, 22(3):265–270.
- [28] 丁 兰, 耿金鹏, 秦 垒, 等. 质子和太空辐射对金鱼草的诱变效应[J]. 北方园艺, 2019(15):82–90.
- [29] 金 颖, 徐美红. 太空草莓种子与常规品种草莓种子发芽率对比[J]. 上海农业科技, 2019(2):76, 96.
- [30] 高文远, 赵淑平, 薛 岚, 等. 空间条件对红花种子发芽的影响[J]. 中国药学杂志, 1997, 32(3):135–138.
- [31] 沈镇德, 赵毓桔. 西瓜种子搭载卫星返回地面的试验初报[C]//中国微重力科学与空间实验——首届学术讨论会论文集. 北京:中国科学技术出版社, 1987:189.
- [32] 朱治平, 吴敦肃, 黄庆榴, 等. 空间对水稻、绿花菜种子萌发的影响[C]//中国微重力科学与空间实验——首届学术讨论会论文集. 北京:中国科学技术出版社, 1987:212.
- [33] 蒋兴村, 李金国, 张 帆, 等. 空间条件下植物种子的变异[C]//中国微重力科学与空间实验——首届学术讨论会论文集. 北京:中国科学技术出版社, 1987:224.
- [34] 黄夕洋, 覃信梅, 李 虹, 等. 罗汉果航天早熟突变体种质的生物学性状比较与应用[J]. 北方园艺, 2018(2):166–171.
- [35] 汤泽生, 杨 军, 赵 燕, 等. 航天诱变凤仙花 SP1 代花、果实和种子的研究[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2005, 26(1):47–51.
- [36] 李 谨, 耿金鹏, 曹天光, 等. 太空环境对仙客来诱变效应的研究[J]. 北方园艺, 2015(4):112–115.
- [37] 龚佳梦, 耿金鹏, 曹天光, 等. 金莲花的诱变生物学效应研究[J]. 河北工业大学学报, 2019, 48(2):9–14, 47.
- [38] 刘 敏, 薛 淮, 鹿金颖, 等. 空间环境对植物试管苗生长发育及遗传变异的影响[J]. 科技导报, 2004, 6:23–25.
- [39] 薛 淮, 刘 敏, 鹿金颖, 等. 空间环境对月季组培苗生物学特性的影响[J]. 自然科学进展, 2005, 15(2):173–178.
- [40] 吴如健, 黄镜浩, 温寿星, 等. 航天搭载后福橘(*Citrus reticulata* Blanco)茎尖无性系有丝分裂行为和细胞超微结构的变化[J]. 核农学报, 2011, 25(2):259–265, 297.
- [41] 邹原东, 陈秀新, 范继红. 空间搭载对芹菜生物量积累及生理特性的影响[J]. 北方园艺, 2013(19):41–44.
- [42] 邹原东, 范继红, 韩振芹. 空间搭载对芹菜幼苗生理特性的影响[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(3):601–603.
- [43] Chen Y, Lu J Y, Li H S, et al. Effects of spaceflight and simulated microgravity on cell sub-microstructure and antioxidant enzyme activity in tomato[J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58(2):338–345.
- [44] 李华盛, 鹿金颖, 潘 毅, 等. 航天环境对拟南芥幼苗内参基因表达稳定性的影响[J]. 航天医学与医学工程, 2014, 27(1):50–53.
- [45] Li H S, Lu J Y, Zhao H, et al. The impact of space environment on gene expression in *Arabidopsis thaliana* seedlings[J]. Science China Technological Sciences, 2017, 60(6):902–910.
- [46] Ferl R, Wheeler R, Levine H G, et al. Plants in space[J]. Current Opinion Plant Biology, 2002, 5(3):258–263.
- [47] Berkovich Y A, Krivobok N M, Sinyak Y Y, et al. Developing a vitamin greenhouse for the life support system of the international space station and for future interplanetary missions[J]. Advances in Space Research, 2004, 34(7):1552–1557.
- [48] Wolff S A, Coelho L H, Zabrodina M, et al. Plant mineral nutrition, gas exchange and photosynthesis in space: a review[J]. Advances in Space Research, 2013, 51(3):465–475.
- [49] Yano S, Kasahara H, Masuda D, et al. Improvements in and actual performance of the plant experiment unit onboard kibo, the Japanese experiment module on the international space station[J]. Advances in Space Research, 2013, 51(5):780–788.
- [50] Wheeler R M, Sager J C, Prince R P, et al. Crop production for advanced life support systems[R]. Florida: Kennedy Space Center, 2003.
- [51] 刘 红, Gitelzon I I, 胡恩柱, 等. 生物再生生命保障系统理论与技术[M]. 北京:科学出版社, 2009.