

# 太空诱变对金钗石斛光合特性和生长的影响

彭曦, 叶庆生\*

(华南师范大学生命科学学院, 广州 510631)

**摘要:** 为了解太空诱变对金钗石斛(*Dendrobium nobile*)生长发育的影响, 对太空诱变和野生金钗石斛的叶片结构、光合特性和生长指标进行了比较研究。结果表明, 太空诱变后的金钗石斛叶片较厚, 叶气孔密度大、气孔器长轴和短轴长度均变长。两种金钗石斛的光合速率日变化趋势相似, 均为双峰型曲线, 但太空诱变的净光合速率低于野生的。太空诱变和野生金钗石斛最大净光合速率分别为 4.6 和 6.8  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , 光补偿点分别为 18.3 和 12.6  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , 光饱和点分别为 1180 和 720  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。太空诱变和野生金钗石斛的  $\text{CO}_2$  补偿点分别为 100 和 102  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ,  $\text{CO}_2$  饱和点分别为 2215 和 2090  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ 。太空诱变的金钗石斛单茎鲜重和干重均低于野生种, 但由于其分蘖数增加, 每盆的总生物量反而增加; 太空诱变的金钗石斛生物碱和石斛多糖含量显著高于野生种。因此, 太空诱变为金钗石斛育种和品质改良提供了新途径。

**关键词:** 金钗石斛; 太空诱变; 光合特性

doi: 10.11926/jtsb.3708

## Effects of Space Mutation on Photosynthetic Characteristics and Growth of *Dendrobium nobile*

PENG Xi, YE Qing-sheng\*

(School of Life Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

**Abstract:** In order to understand the effects of space mutation on development of *Dendrobium nobile*, the leaf structure, photosynthetic characteristics and growth index between space mutation and wild type were compared. The results showed that there were thick leaf, dense stoma, and big stomatal apparatus in space mutation *D. nobile*. Diurnal variation of net photosynthetic rate (Pn) of the two kinds of *D. nobile* showed a similar bimodal curve. However, Pn of space mutation *D. nobile* was lower than that of wide type. The maximum photosynthetic rates of space mutation and wild *D. nobile* were 4.6 and 6.8  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , light compensation rates (LCP) were 18.3 and 12.6  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , light saturation points (LSP) were 1180 and 720  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ,  $\text{CO}_2$  compensation points (CCP) were 100 and 102  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ,  $\text{CO}_2$  saturation points (CSP) were 2215 and 2090  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ , respectively. Fresh weight (FW) and dry weight (DW) per shoot of space mutation *D. nobile* was lower than that of wide type. However, due to the increment of tiller number, total biomass per pot in the space mutation *D. nobile* was more than that of the wild type. Additionally, the total alkaloid and polysaccharide contents in space mutation *D. nobile* was significantly higher than those of wide type. So, space mutation would provide a new way for breeding and quality improvement of *D. nobile*.

**Key words:** *Dendrobium nobile*; Space mutation; Photosynthetic characteristics

收稿日期: 2017-01-17 接受日期: 2017-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(30970215); 广东省科技计划项目(2013B090600147)资助

This work was supported by the National Nature Science Foundation of China (Grant No. 30970215); and the Project for Science and Technology Program of Guangdong (Grant No. 2013B090600147).

作者简介: 彭曦(1992~), 女, 硕士研究生, 主要从事植物生长发育与调控研究。E-mail: 772008356@qq.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: yelab@scnu.edu.cn

金钗石斛(*Dendrobium nobile*)为石斛属植物,喜温暖、湿润、阴凉的环境,常生于有腐殖质聚集的岩石或树干上,在我国主要分布于台湾、福建、湖南、湖北、广东、广西、贵州、云南、四川、海南岛等长江以南的亚热带地区<sup>[1-2]</sup>。其花形优美、花色艳丽,具有较高的观赏价值<sup>[2-3]</sup>。同时,金钗石斛含石斛碱、石斛多糖等多种有效活性物质,是一种珍贵的药用植物。研究表明,石斛碱对心血管系统、内分泌系统、消化系统、神经系统等具有调节作用<sup>[4]</sup>。石斛多糖具有抗氧化、抗肿瘤、抗炎、抗疲劳、提高人体免疫力等作用<sup>[5-6]</sup>。

苏文华等<sup>[7]</sup>报道,金钗石斛的光合作用可在CAM途径和C<sub>3</sub>途径间变化,饱和光强为1000  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。杨丽娜等<sup>[8]</sup>的研究表明金钗石斛在光强为300  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 时达到光饱和点,光合作用日变化呈双峰曲线。任建武等<sup>[9]</sup>报道金钗石斛冬季的光饱和点为300  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。

太空育种是指利用返回式航天器搭载生物种质材料进入宇宙空间,利用太空特殊环境诱变生物基因产生变异,再通过返回地面选育,培育新品种、新材料的育种新技术<sup>[10]</sup>。太空育种具有变异类型多、变异频率高等特点,近年来太空育种在药用植物的研究取得了许多新的进展,如丹参(*Salvia miltiorrhiza*)、迷迭香(*Rosmarinus officinalis*)等<sup>[11-12]</sup>。本研究比较了太空诱变和野生金钗石斛在光合特性和生长等方面的差别,为培育金钗石斛新品种和品质改良提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

金钗石斛(*Dendrobium nobile*)种子取自华南师范大学国兰中心栽培的生长健壮、无病虫害的金钗石斛的成熟蒴果,在超净工作台上取出种子密封于塑料袋中。神舟8号飞船于2011年11月1日5:58在中国酒泉卫星发射中心由长征2号F遥八运载火箭发射升空,在近地点200 km,远地点330 km的轨道飞行,时长397 h。2012年将太空诱变的金钗石斛种子和野生的种子进行无菌播种。经太空诱变的种子比野生的萌发启动慢,整体萌发率偏低,原球茎开始分化时间较野生的晚5 d左右。播种150 d后,幼苗出瓶,一部分太空苗分蘖增多,部分太空苗分化出花芽,少数太空苗出现白化现象。大部分

太空诱变金钗石斛幼苗呈现矮化、茎加粗、分蘖多、叶片变短的趋势。将太空诱变的幼苗经多年的栽培、筛选,获得了一批性状稳定、株型矮壮、分蘖能力强的太空诱变金钗石斛植株。2016年5月选择生长均匀、健康无病虫害的金钗石斛太空苗(T)和野生苗(CK)各50株,均栽种于华南师范大学国兰中心遮阴度50%的玻璃温室内,每周使用1次10倍稀释的Hoagland溶液。

### 1.2 叶片显微结构观察

制作金钗石斛叶石蜡切片,于普通光学显微镜下观察。叶扫描电镜观察在中国科学院华南植物园公共实验室完成。石蜡切片制片和扫描电镜样品制备参考《植物显微技术》<sup>[15]</sup>的方法。

### 1.3 光合特性

2016年7月选取金钗石斛健康功能叶(从顶部向下第4片叶),用LI-6400便携式光合系统(Li-Cor, USA)测定净光合速率(Pn)、光合有效辐射(PAR)、温度(T<sub>air</sub>)等指标,5次重复。

**净光合速率(Pn)日变化** 选择晴朗的一天,从7:30到17:30每隔2 h同时测定Pn、PAR、T<sub>air</sub>等参数。

**光响应曲线** 设置不同PAR梯度(0~1200  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ),用Pn-PAR自动测定功能测定Pn等相关参数。利用修正直角双曲线进行拟合,得出表观量子效率(AQY)、最大净光合速率(P<sub>max</sub>)、光补偿点(LCP)、光饱和点(LSP)、呼吸速率(Rd)等参数。

**CO<sub>2</sub> 响应曲线** 设置不同二氧化碳浓度(50~1500  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ),用Ci-自动测定功能测定Pn等相关参数。曲线拟合方法同上,得出CO<sub>2</sub>补偿点(CCP)、CO<sub>2</sub>饱和点(CSP)、最大净光合速率(P<sub>max</sub>)、光呼吸(Rp)等参数。

### 1.4 方法

**株高和茎粗** 选取生长良好的金钗石斛,用米尺测量株高,用游标卡尺测量茎粗。

**干、鲜重** 收获金钗石斛单株(1年生),洗净于阴凉处晾干,对地上部分和地下部分分别进行称重,得鲜重。将鲜样于烘箱中105℃杀青20 min,再80℃烘至恒重,称量得干重。

**叶面积和叶片厚度** 用叶面积仪(Yaxin-1241)测量从顶部向下第4片叶的面积,叶片厚度通

过制作石蜡切片于显微镜下测定。

**叶绿素含量** 取金钗石斛从顶部向下第 4 片叶, 参照舒展<sup>[14]</sup>方法测定叶绿素含量, 略有改动。

**生物碱和多糖的测定** 选取金钗石斛 1 年龄的茎, 干燥后磨成粉末, 过 60 目标标准检验筛, 得样品粉末。生物碱含量测定参照金蓉鸾等<sup>[15]</sup>的方法, 多糖含量测定采用苯酚-硫酸法, 参照《中华人民共和国药典》2010 版。

## 1.5 数据统计和分析

数据采用 Sigmaplot、SPSS 软件进行统计分析;

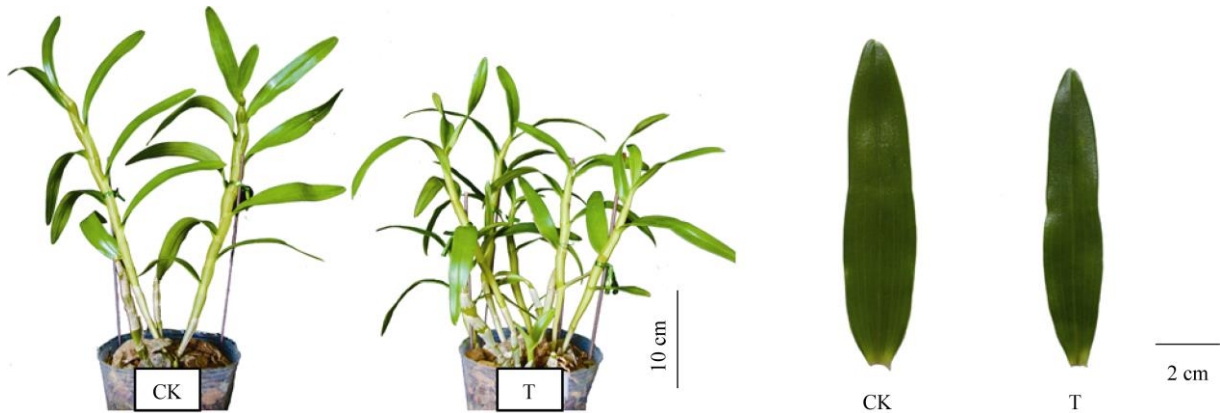


图 1 太空诱变对金钗石斛株型的影响。CK: 野生种; T: 太空诱变。下图同。

Fig. 1 Effects of space mutation on plant shape of *Dendrobium nobile*. CK: Wild type; T: Space mutation. The same is following Figures.

表 1 太空诱变对金钗石斛株型的影响

Table 1 Effects of space mutation on plant type of *Dendrobium nobile*

	株高 (cm) Plant height	茎粗 (mm) Stem diameter	叶面积 (cm <sup>2</sup> ) Leaf area	叶片厚度 (μm) Leaf thickness
野生种 Wide type	28.8 ± 3.8	10.5 ± 1.1	24.1 ± 4.1	481.4 ± 9.3
太空诱变 Space mutation	23.7 ± 2.6**	9.3 ± 1.2**	16.1 ± 2.0*	503.1 ± 32.5

\*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ 。下同。

\*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ . The same is following Figures and Tables.

## 2.2 叶片结构观察

如图 2 所示, 两种金钗石斛叶片的表皮细胞均呈正方形或长方形, 排列整齐且紧密。和下表皮细胞相比, 上表皮细胞较大, 细胞更长。叶肉细胞呈无规则排列, 无栅栏组织和海绵组织的分化, 叶肉细胞大小无明显差异。

扫描电镜下, 太空诱变和野生金钗石斛叶片上下表皮均覆盖有厚厚的蜡质, 上表皮的蜡质更厚, 同时上下表皮均存在腺体, 腺体上附有蜡质的片状结构能防止水分散失(图 3)。太空诱变的叶片气孔密

度显著高于野生的, 气孔器长度和宽度也明显大于野生的(表 2, 图 3: A)。

## 2 结果和分析

### 2.1 株型变化

和同龄的野生金钗石斛比较, 太空诱变的金钗石斛株型较矮, 植株总体显得矮粗, 且分蘖较多(图 1, 表 1)。野生种的叶片呈长圆形, 叶缘中部有轻微的内凹或内凹不明显; 太空诱变的金钗石斛叶面积显著降低, 叶形更狭长, 叶缘中部有明显的内凹。

度显著高于野生的, 气孔器长度和宽度也明显大于野生的(表 2, 图 3: A)。

### 2.3 光合特性

从图 4 可见, 太空诱变和野生的金钗石斛净光合速率日变化均呈双峰曲线型。上午随着 PAR 增强, 净光合速率不断上升, 9:30 达到一天中的最大值, 而后呈现下降趋势, 到 13:30 后又开始回升, 在 15:30 达到第二高峰, 之后随 PAR 降低, 净光合速率逐渐下降。第二高峰的光合速率远低于第一高

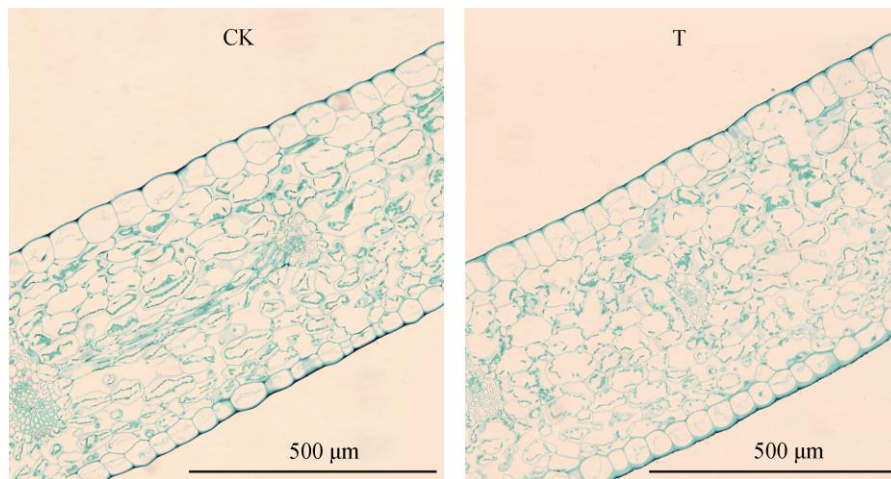


图 2 金钗石斛叶片厚度

Fig. 2 Leaf thickness of *Dendrobium nobile*

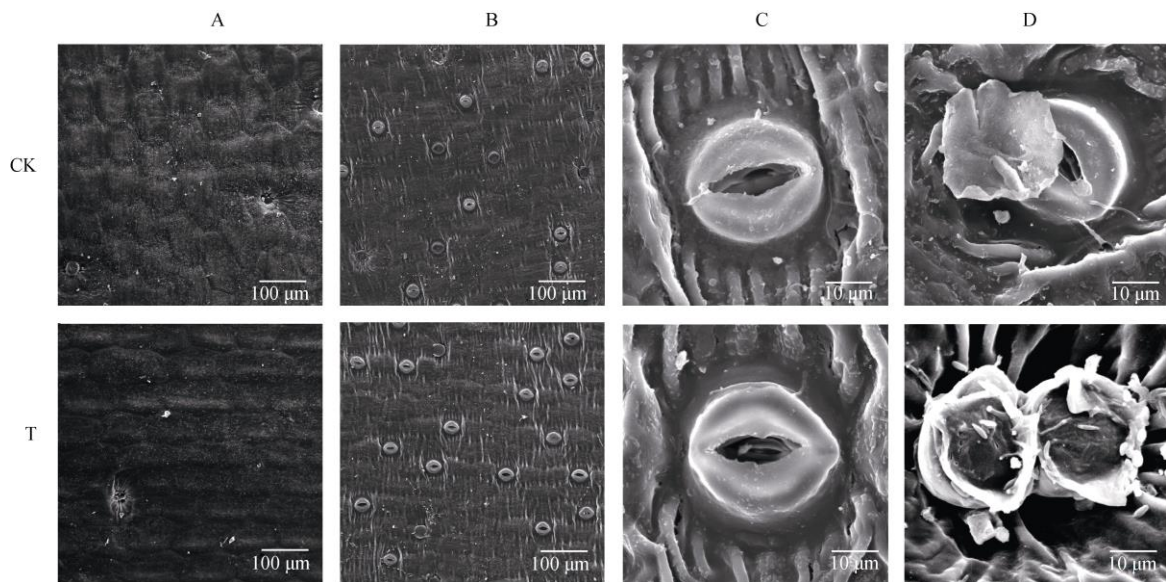


图 3 金钗石斛叶表皮扫描电镜图。A: 上表皮; B: 下表皮; C: 气孔; D: 气孔上的蜡质气孔盖(上), 腺体(下)。

Fig. 3 Leaf surface of *Dendrobium nobile* under scanning electron microscope (SEM). A: Adaxial epidermis; B: Abaxial epidermis; C: Stomata; D: Waxy stoma cover on stomata (the upper), glands (the bottom).

表 2 金钗石斛叶片气孔特征的变化

Table 2 Changes in stomatal characteristics of *Dendrobium nobile*

	密度 Density	长度 Length (μm)	宽度 Width (μm)
野生种 Wide type	33.0 ± 2.0	30.0 ± 1.2	25.4 ± 0.7
太空诱变 Space mutation	43.8 ± 2.6*	32.7 ± 0.5*	26.9 ± 0.7

峰, 中午出现明显的低谷, 说明他们均存在光合午休现象, 这是受中午高光照强度、高温等环境因素影响的结果。太空诱变金钗石斛的净光合速率一直低于野生种。

两种金钗石斛的光响应曲线相似(图 5)。PAR 在 0~150 μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> 时, 随着光照增强, 净光合速率呈线性增强, 之后随着 PAR 增大, 净光合速率增长缓慢并趋于稳定。野生金钗石斛的最大净

光合速率( $P_{max}$ )为  $6.8 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、光补偿点为  $12.6 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、光饱和点为  $720 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，而太空诱变金钗石斛的最大净光合速率为  $4.6 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、光补偿点为  $18.3 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、光饱和点为  $1180 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (表 3)。太空诱变金钗石斛的光合速率低于野生种。

随着  $\text{CO}_2$  浓度升高，净光合速率逐渐增强。野生金钗石斛  $\text{CO}_2$  饱和点为  $2090 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，最大  $P_n$  为  $15.4 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ；太空诱变金钗石斛  $\text{CO}_2$  饱和点为  $2215 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，最大  $P_n$  为  $11.2 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。

### 2.4 叶绿素

从图 6 可见，太空诱变金钗石斛叶片的叶绿素

a、叶绿素 b 和总叶绿素含量都显著高于野生种的。太空和野生金钗石斛的  $\text{Chl a/b}$  值相近，分别为 2.55 和 2.57，表现出  $\text{C}_3$  植物特征。

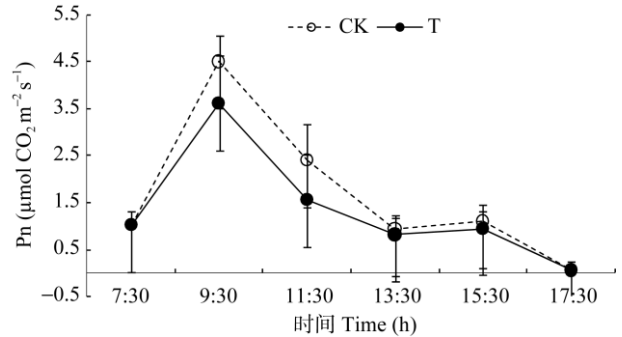


图 4 金钗石斛的净光合速率( $P_n$ )日变化

Fig. 4 Daily changes in net photosynthetic rate ( $P_n$ ) of *Dendrobium nobile*

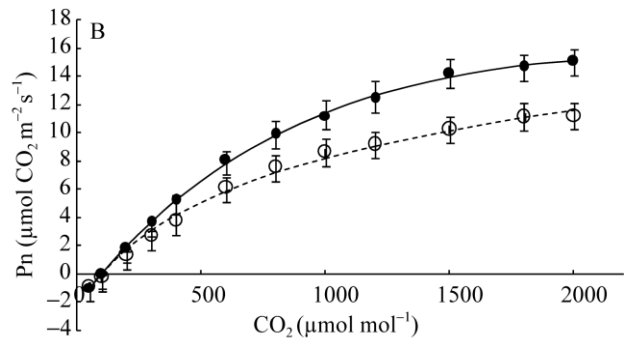
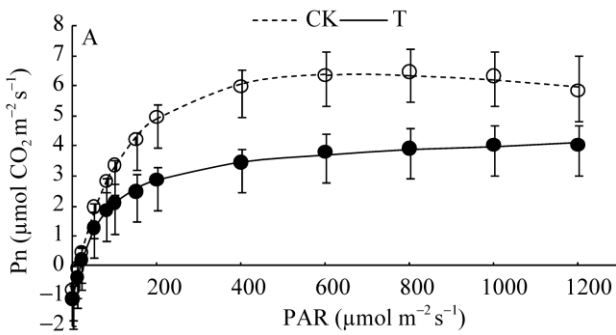


图 5 金钗石斛的光响应曲线(A)和  $\text{CO}_2$  响应曲线(B)

Fig. 5 Light response curve (A) and  $\text{CO}_2$  response curve (B) of *Dendrobium nobile*

表 3 金钗石斛的光合特性

Table 3 Photosynthetic characteristics of *Dendrobium nobile*

	光响应曲线 Light response curve					CO <sub>2</sub> 响应曲线 CO <sub>2</sub> response curve			
	AQY	$P_{max}$	LCP	LSP	Rd	CCP	CSP	$P_{max}$	Rp
野生种 Wide type	$0.07 \pm 0.00$	$6.8 \pm 0.6$	$12.6 \pm 1.7$	$720 \pm 230$	$0.8 \pm 0.1$	$102 \pm 12$	$2090 \pm 418$	$11.2 \pm 2$	$2.3 \pm 0.3$
太空诱变 Space mutation	$0.08 \pm 0.02$	$4.6 \pm 1.2^*$	$18.3 \pm 11.2$	$1180 \pm 79^*$	$1.1 \pm 0.4$	$100 \pm 3$	$2215 \pm 451$	$15.4 \pm 1^*$	$2.3 \pm 0.5$

AQY: 表观量子效率;  $P_{max}$ : 最大净光合速率( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ); LCP: 光补偿点( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ); LSP: 光饱和点( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ); Rd: 暗呼吸速率( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ); CCP:  $\text{CO}_2$  补偿点( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ); CSP:  $\text{CO}_2$  饱和点( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ); Rp: 光呼吸速率( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )。

AQY: Apparent quantum yield;  $P_{max}$ : Maximum photosynthesis rate ( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ); LCP: Light compensation point ( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ); LSP: Light saturation point ( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ); Rd: Dark respiratory rate ( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ); CCP:  $\text{CO}_2$  compensation point ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ); CSP:  $\text{CO}_2$  saturation point ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ); Rp: photorespiratory rate ( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ).

### 2.5 生长指标

鲜重和干重是反映植物生长状况的重要指标。结果表明(表 4)，太空诱变金钗石斛的单株鲜重和干重都显著低于野生种，分别降低了 47% 和 67%。但太空诱变的金钗石斛分蘖较多，每盆株数是野生的

2.5 倍，因而尽管单株生物量降低，每盆总生物量反而增加。

金钗石斛中的主要药用成分是石斛碱和多糖<sup>[2]</sup>。结果表明，太空诱变后的金钗石斛茎中总生物碱和多糖含量分别为 0.55% 和 11.26%，野生金钗石斛茎

表4 1 龄金钗石斛的鲜重和干重

Table 4 Fresh weight (FW) and dry weight (DW) of 1-year-old *Dendrobium nobile*

	单株鲜重 (g) FW per plant	单株干重 (g) DW per plant	每盆株数 Number per pot	每盆鲜重 (g) FW per pot	每盆鲜重 (g) DW per pot
野生种 Wide type	19.2 ± 7.0	2.3 ± 0.8	1.3 ± 0.3	24.9 ± 2.1	2.9 ± 0.2
太空诱变 Space mutation	12.9 ± 4.4**	1.5 ± 0.5**	3.3 ± 0.6*	42.6 ± 2.7**	5.0 ± 0.3**

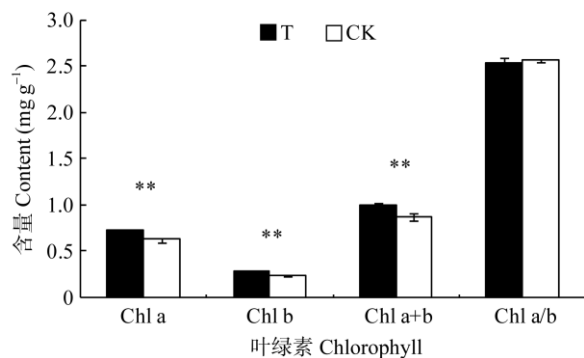


图6 金钗石斛叶绿素含量

Fig. 6 Chlorophyll content in *Dendrobium nobile* leaves

中分别为 0.21% 和 7.63%，太空诱变使金钗石斛总生物碱和多糖含量分别增加了 160% 和 50%，差异显著。

### 3 讨论

太空中强辐射、弱地磁、超真空和超洁净的特殊空间环境可诱发生物种质材料产生基因变异，产生多样化诱变效果，获得优良新种质，进而通过地面选择育种获得新品种<sup>[10]</sup>。光合作用对植物的生长和发育至关重要。叶片光合效率除与叶绿素含量、光照强度、环境温度等因子有关外，还受到叶片厚度、叶片成熟程度、空气湿度、土壤含水量等因子的影响<sup>[16]</sup>。叶片是进行光合作用的主要器官，太空诱变后的叶面积较小，导致光合单叶面积降低，而叶片增厚在一定程度上补偿了叶面积降低导致的光合总面积下降。气孔是 CO<sub>2</sub> 等气体进出叶片的门户，太空诱变后的金钗石斛气孔密度和气孔器长、宽都高于野生种，一定程度上增强了气体交换的速率。有研究表明，石斛属植物的光饱和点均很低，为典型的阴生植物<sup>[17-20]</sup>。朱巧玲等<sup>[21-22]</sup>的研究表明，黑毛石斛(*Dendrobium williamsonii*)、长距石斛(*D. longicornu*)、束花石斛(*D. chrysanthum*)和黄花石斛(*D. dixanthum*)均属于 C<sub>3</sub> 植物类型，具有半阴生植物的特点。吴刚毅等<sup>[23]</sup>从光合日变化、光响应曲线、

CO<sub>2</sub> 响应曲线、光合酶活性等指标对金钗石斛、肿节石斛(*D. pendulum*)、鼓槌石斛(*D. chrysotoxum*)和密花石斛(*D. densiflorum*)的光合特性进行研究，结果表明这 4 种石斛都是半阴生 C<sub>3</sub> 植物。本研究中野生金钗石斛的最大净光合速率与吴刚毅等<sup>[2]</sup>的结果 (6.06 μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>) 相近<sup>[23]</sup>。光合日变化研究表明，太空诱变后的金钗石斛和野生种的净光合速率均呈现双峰曲线，符合 C<sub>3</sub> 植物的光合“午休”特点。但太空诱变后金钗石斛的光合能力低于野生种，这可能是太空诱变导致碳同化过程中某些酶活性降低，因此限制了光合作用。有研究表明，太空诱变能明显提高梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、番茄(*Lycopersicon esculentum*)、小桐子(*Lycopersicon esculentum*)等植物的光合能力，这说明太空诱变对不同植物光合能力的影响是不同的<sup>[24-26]</sup>。LCP 反映了植物对弱光的利用能力，LSP 反映了光合机构暗反应过程对同化力的最大需求量，体现了植物对强光的适应能力<sup>[27-28]</sup>。太空诱变金钗石斛的 LCP、LSP 高于野生的，表明太空诱变降低了金钗石斛对弱光的利用能力，同时提高了金钗石斛对强光的适应能力。两组石斛的 CSP 均超过 1000 μmol mol<sup>-1</sup>，表明提高 CO<sub>2</sub> 水平有助于促进植物的光合速率，提高其产量和品质。

金钗石斛经太空诱变后叶绿素 a 和叶绿素 b 含量显著升高，导致叶绿素总量升高，增强了叶片吸收、传递和转化光能的能力。研究表明，多数植物(如丹参等)经太空诱变后叶绿素含量表现出升高<sup>[11]</sup>，Li 等<sup>[29]</sup>报道空间诱变后的玉米(*Zea mays*)叶绿素总含量降低。太空诱变对不同植物株高的影响也不同，太空诱变的金钗石斛株高明显降低，株型较矮粗。研究表明，航天搭载的桔梗(*Platycodon grandiflorus*)和二色胡枝子(*Lespedeza bicolor*)株高明显降低<sup>[30-31]</sup>，芝麻(*Sesamum indicum*)株高明显增加<sup>[32]</sup>，洋金花(*Datura metel*)没有显著变化<sup>[33]</sup>。太空诱变降低了金钗石斛叶片的光合能力，也降低了单株的鲜重和干重。但太空诱变后的金钗石斛分蘖能力明显增强，由于每盆单株数较多，整体的生物量仍然增加。

药用植物育种的目标除了产量, 更加注重品质, 特别是有效成分(次生代谢物)含量<sup>[10]</sup>。生物碱和多糖是金钗石斛中主要的有效成分, 因而很大程度上决定了石斛品质。据报道, 金钗石斛生物碱含量约为 0.41%~0.64%, 以石斛碱为主<sup>[3,15]</sup>。王再花等<sup>[34]</sup>的研究表明, 金钗石斛的多糖含量为 10%, 大多数春石斛品种的多糖含量为 10%~25%。据报道, 红花(*Carthamus tinctorius*)、桔梗、甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)等药用植物种子经太空搭载后, 抗逆性增强、活性成分提高, 品质明显改良<sup>[10,30,35-36]</sup>。本研究结果表明, 太空诱变的金钗石斛生物碱和多糖含量均显著高于野生的, 大大提升了金钗石斛的品质。

## 参考文献

- [1] LIU L, LI Z M, LI W Y. A review of the studies on *Dendrobium nobile* [J]. *J Yunnan Univ (Nat Sci)*, 2009, 31(S1): 509-513.  
刘莉, 李智敏, 李晚谊. 金钗石斛的研究进展 [J]. *云南大学学报 (自然科学版)*, 2009, 31(S1): 509-513.
- [2] WANG L, YE Q S, LIU W. A review of advances in research on *Dendrobium nobile* [J]. *Subtrop Plant Sci*, 2004, 33(2): 73-76. doi: 10.3969/j.issn.1009-7791.2004.02.022.  
王琳, 叶庆生, 刘伟. 金钗石斛研究概况 [J]. *亚热带植物科学*, 2004, 33(2): 73-76. doi: 10.3969/j.issn.1009-7791.2004.02.022.
- [3] GUAN Z B, LI Z L, LI E. A rare and endangered medicinal plant: *Dendrobium nobile* [J]. *Chin Wild Plant Res*, 2002, 21(4): 36-37. doi: 10.3969/j.issn.1006-9690.2002.04.012.  
管志斌, 李再林, 里二. 珍稀名贵中药—金钗石斛 [J]. *中国野生植物资源*, 2002, 21(4): 36-37. doi: 10.3969/j.issn.1006-9690.2002.04.012.
- [4] CHEN J. Advances in total alkaloids of *Dendrobium nobile* [J]. *J Mod Med Health*, 2016, 32(5): 728-730. doi: 10.3969/j.issn.1009-5519.2016.05.032.  
陈晶. 金钗石斛生物总碱研究进展 [J]. *现代医药卫生*, 2016, 32(5): 728-730. doi: 10.3969/j.issn.1009-5519.2016.05.032.
- [5] LUO A X, HE X J, ZHOU S D, et al. Purification, composition analysis and antioxidant activity of the polysaccharides from *Dendrobium nobile* Lindl. [J]. *Carbohydr Polym*, 2010, 79(4): 1014-1019. doi: 10.1016/j.carbpol.2009.10.033.
- [6] AN F J, HE Y X. Research advance of polysaccharides from *Dendrobium nobile* Lindl. [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2014, 42(13): 3857-3862. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2014.13.031.  
安凤娟, 何宇新. 金钗石斛多糖的研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(13): 3857-3862. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2014.13.031.
- [7] SU W H, ZHANG G F. Primary study on photosynthetic characteristics of *Dendrobium nobile* [J]. *J Chin Med Mat*, 2003, 26(3): 157-159. doi: 10.3321/j.issn.1001-4454.2003.03.001.  
苏文华, 张光飞. 金钗石斛光合作用特征的初步研究 [J]. *中药材*, 2003, 26(3): 157-159. doi: 10.3321/j.issn.1001-4454.2003.03.001.
- [8] YANG L N, WANG Y, HU Q, et al. Comparative study on photosynthesis between three *Dendrobium* and *Kalanchoe daigremontiana* [J]. *J Shanxi Agric Univ (Nat Sci)*, 2011, 31(4): 294-301. doi: 10.3969/j.issn.1671-8151.2011.04.002.  
杨丽娜, 王雁, 胡青, 等. 三种石斛与大叶落地生根光合作用比较研究 [J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2011, 31(4): 294-301. doi: 10.3969/j.issn.1671-8151.2011.04.002.
- [9] REN J W, WANG Y, PENG Z H. Characteristics of photosynthesis in three *Dendrobium* species cultivated in green house during winter [J]. *J NW For Univ*, 2009, 24(1): 39-43.  
任建武, 王雁, 彭镇华. 3 种温室栽培石斛冬季光合特性研究 [J]. *西北林学院学报*, 2009, 24(1): 39-43.
- [10] KONG S X, CUI X S, LI H K. Research progress of space seeding of medicinal plants [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2014, 30(6): 273-278. doi: 10.11924/j.issn.1000-6850.2013-1433.  
孔四新, 崔旭盛, 李海奎. 药用植物太空育种研究进展 [J]. *中国农学通报*, 2014, 30(6): 273-278. doi: 10.11924/j.issn.1000-6850.2013-1433.
- [11] ZHOU G L, XU B, LIU Y J, et al. Content of soluble sugar and chlorophyll in space-carrying *Salvia multiorrhiza* SP1 [J]. *CS Pharm*, 2015, 13(2): 192-194.  
周国莉, 徐贝, 刘应蛟, 等. 航天搭载丹参 SP1 的叶绿素及可溶性糖的含量测定分析 [J]. *中南药学*, 2015, 13(2): 192-194.
- [12] WANG H Z, GUO X R, TANG Z H, et al. Effect of space mutation on morphological parameters, photosynthetic capacities as well as contents and compositions of secondary metabolites of *Rosmarinus officinalis* L. [J]. *Bull Bot Res*, 2013, 33(3): 287-293. doi: 10.7525/j.issn.1673-5102.2013.03.007.  
王洪政, 郭晓瑞, 唐中华, 等. 太空诱变对迷迭香(*Rosmarinus officinalis* L.)形态参数、光合能力和次生代谢产物含量和成分的影响 [J]. *植物研究*, 2013, 33(3): 287-293. doi: 10.7525/j.issn.1673-5102.2013.03.007.
- [13] LI H P. *Plant Microtechnique* [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2009: 9-39, 85-89.  
李和平. *植物显微技术* [M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2009: 9-39, 85-89.
- [14] SHU Z, ZHANG X S, CHEN J, et al. The simplification of chlorophyll content measurement [J]. *Plant Physiol Comm*, 2010, 46(4): 399-402.

- 舒展, 张晓素, 陈娟, 等. 叶绿素含量测定的简化 [J]. 植物生理学通讯, 2010, 46(4): 399–402.
- [15] JIN R L, SUN J J, ZHANG Y M. A determination of total alkaloids in eleven species of Shihu (*Dendrobium*) [J]. J China Pharm Univ, 1981, 22(1): 9–13.  
金蓉鸾, 孙继军, 张远名. 11种石斛的总生物碱的测定 [J]. 中国药科大学学报, 1981, 22(1): 9–13.
- [16] LÜ X K, XU C H, SHU X Y. Characteristics of photosynthesis in three *Dendrobium* species [J]. Chin Trad Herb Drugs, 2004, 35(11): 1296–1298. doi: 10.3321/j.issn:0253-2670.2004.11.042.  
吕献康, 徐春华, 舒小英. 3种石斛的光合特性研究 [J]. 中草药, 2004, 35(11): 1296–1298. doi: 10.3321/j.issn: 0253-2670.2004.11.042.
- [17] LIU G H, LI K, SUN Y Y, et al. Study of photosynthetic characteristics of *Dendrobium devonianum* [J]. For Res, 2014, 27(2): 265–269.  
刘高慧, 李昆, 孙永玉, 等. 齿瓣石斛光合特性研究 [J]. 林业科学研究, 2014, 27(2): 265–269.
- [18] REN J W, WANG Y, PENG Z H, et al. Comparative study on PEPC activity in three *Dendrobium* leaves [J]. J Yunnan Agric Univ, 2011, 26(6): 815–820. doi: 10.3969/j.issn.1004-390X(n).2011.06.015.  
任建武, 王雁, 彭镇华, 等. 3种石斛 PEPC 羧化酶活力比较 [J]. 云南农业大学学报, 2011, 26(6): 815–820. doi: 10.3969/j.issn.1004-390X(n).2011.06.015.
- [19] SHEN Z G, CHEN C Q, WANG L L, et al. Photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of three *Dendrobium* species [J]. Acta Bot Boreali-Occid Sin, 2010, 30(10): 2067–2073.  
沈宗根, 陈翠琴, 王岚岚, 等. 3种石斛光合作用和叶绿素荧光特性的比较研究 [J]. 西北植物学报, 2010, 30(10): 2067–2073.
- [20] ZHU Q L, LENG J Y, YE Q S. Photosynthetic characteristics of *Dendrobium williamsonii* and *D. longicornu* [J]. Chin Bull Bot, 2013, 48(2): 151–159. doi: 10.3724/SP.J.1259.2013.00151.  
朱巧玲, 冷佳奕, 叶庆生. 黑毛石斛和长距石斛的光合特性 [J]. 植物学报, 2013, 48(2): 151–159. doi: 10.3724/SP.J.1259.2013.00151.
- [21] WANG Y, SUN Y, LI Z J, et al. Characteristics of photosynthesis in three *Dendrobium* species with ten culture media [J]. For Res, 2008, 21(6): 778–782. doi: 10.3321/j.issn:1001-1498.2008.06.008.  
王雁, 孙晔, 李振坚, 等. 3种石斛在不同基质中的光合特性研究 [J]. 林业科学研究, 2008, 21(6): 778–782. doi: 10.3321/j.issn:1001-1498.2008.06.008.
- [22] ZHU Q L, LENG J Y, YE Q S. Study on photosynthetic characteristics of *Dendrobium chrysanthum* and *Dendrobium dixanthum* [J]. J S China Norm Univ (Nat Sci), 2013, 45(2): 97–103. doi: 10.6054/j.jscn.2013.01.021.  
朱巧玲, 冷佳奕, 叶庆生. 束花石斛和黄花石斛的光合特性研究 [J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2013, 45(2): 97–103. doi: 10.6054/j.jscn.2013.01.021.
- [23] WU G Y, HUI J A, WANG Z H, et al. Photosynthetic characteristics of four wild *Dendrobium* species in China [J]. HortScience, 2014, 49(8): 1023–1027.
- [24] TIAN Y Z, XIAO H L, SI J H. Study on photosynthetic characteristics of outer space mutation of *Haloxylon ammodendron* [J]. Arid Zone Res, 2008, 25(3): 371–375.  
田永祯, 肖洪浪, 司建华. 太空诱变梭梭光合特性的研究 [J]. 干旱区研究, 2008, 25(3): 371–375.
- [25] ZHAO Y H, WANG Y F, ZHOU R L, et al. Studies on agronomic and photosynthesis characters of tomato mutant with indeterminate growth habit mutated by space mutagenesis [J]. J Anhui Agric Sci, 2009, 37(18): 8423–8424. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2009.18.049.  
赵彦宏, 王艳芳, 周瑞莲, 等. 航天诱变番茄无限生长习性突变体的农艺性状与光合特性研究 [J]. 安徽农业科学, 2009, 37(18): 8423–8424. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2009.18.049.
- [26] HE M X, HU T X, FEI S M, et al. Effect on growth, photosynthetic characteristics and yield of *Jatropha curcas* L. after boarding on spaceship [J]. J Anhui Agric Sci, 2010, 38(5): 2652–2653, 2656. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2010.05.165.  
何明霞, 胡庭兴, 费世民, 等. 航天搭载对小桐子生长、光合特性和产量的影响 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(5): 2652–2653, 2656. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2010.05.165.
- [27] HUANG C L, ZHAO C H, FU S L, et al. Photosynthetic physiologic characteristics of *Shibataea hispida* in Anhui Province [J]. J Anhui Agric Univ, 2005, 32(2): 187–191. doi: 10.3969/j.issn.1672-352X.2005.02.014.  
黄成林, 赵昌恒, 傅松玲, 等. 安徽休宁倭竹光合生理特性的研究 [J]. 安徽农业大学学报, 2005, 32(2): 187–191. doi: 10.3969/j.issn.1672-352X.2005.02.014.
- [28] LI S R, LIU M, WANG Y X, et al. Influence of space conditions on photosynthetic pigment contents and chloroplast ultrastructure of maize leaves [J]. Space Med Med Eng, 1998, 11(6): 396–400.
- [29] FANG B T, SHAO Y H, YUE J Q, et al. Characteristic parameters of light response curves at late grain-filling stage and its responses to nitrogen application rate of winter wheat [J]. Acta Agric Boreali-Occid Sin, 2011, 20(3): 52–56. doi: 10.3969/j.issn.1004-1389.2011.03.011.  
方保停, 邵运辉, 岳俊芹, 等. 冬小麦灌浆后期光响应曲线特征参数及其对施氮量响应 [J]. 西北农业学报, 2011, 20(3): 52–56. doi: 10.3969/j.issn.1004-1389.2011.03.011.
- [30] GAO W Y, ZHAO S P, XUE L, et al. Ultrastructural changes after space flight in *Platycodon grandiflorum* (Jacq.) DC. [J]. Chin J Chin



- Mat Med, 1999, 24(5): 267–268. doi: 10.3321/j.issn:1001-5302.1999.05.004.
- 高文远, 赵淑平, 薛岚, 等. 桔梗卫星搭载后超微结构的变化 [J]. 中国中药杂志, 1999, 24(5): 267–268. doi: 10.3321/j.issn:1001-5302.1999.05.004.
- [31] REN W B, HAN J G, ZHANG Y W, et al. Effects of spaceflight on characteristics of *Lespedeza bicolor* [J]. Acta Agrest Sin, 2006, 14(2): 112–115. doi: 10.11733/j.issn.1007-0435.2006.02.003
- 任卫波, 韩建国, 张蕴薇, 等. 卫星搭载对二色胡枝子生物学特性的影响 [J]. 草地学报, 2006, 14(2): 112–115. doi: 10.11733/j.issn.1007-0435.2006.02.003.
- [32] GAO T M, WEI S L, LI C M, et al. Effects of space-induced mutation and analysis of polymorphsim by AFLP molecular marker in *Sesame* [J]. Acta Agric Boreali Sin, 2013, 28(1): 227–233. doi:10.3969/j.issn.1000-7091.2013.01.040.
- 高桐梅, 卫双玲, 李春明, 等. 芝麻太空诱变效应及 AFLP 标记检测 [J]. 华北农学报, 2013, 28(1): 227–233. doi: 10.3969/j.issn.1000-7091.2013.01.040.
- [33] GAO W Y, ZHAO S P, XUE L, et al. Effect of space flight on ultrastructure in medicinal plant *Datura innoxia* Mill [J]. Chin J Chin Mat Med, 1999, 24(6): 332–334. doi: 10.3321/j.issn:1001-5302.1999.06.005.
- 高文远, 赵淑平, 薛岚, 等. 太空飞行对洋金花超微结构的影响 [J]. 中国中药杂志, 1999, 24(6): 332–334. doi: 10.3321/j.issn:1001-5302.1999.06.005.
- [34] ZHANG J H, CAO J X, ZHU G F, et al. Polysaccharide and total alkaloid content of Nobile-type *Dendrobium* [J]. Chin J Trop Crops, 2013, 34(4): 727–731. doi: 10.3969/j.issn.1000-2561.2013.04.026.
- 章金辉, 操君喜, 朱根发, 等. 春石斛杂交种多糖及生物碱含量比较研究 [J]. 热带作物学报, 2013, 34(4): 727–731. doi: 10.3969/j.issn.1000-2561.2013.04.026.
- [35] GAO W Y, ZHAO S P, XUE L, et al. The effects of space condition on the germination of medicinal plant *Carthamus tinctorius* [J]. Chin Pharm J, 1997, 32(3): 135–138.
- 高文远, 赵淑平, 薛岚, 等. 空间条件对红花种子发芽的影响 [J]. 中国药理学杂志, 1997, 32(3): 135–138.
- [36] GAO W Y, LI K F, GAO X M, et al. Effects of space flight on DNA mutation and secondary metabolites of licorice (*Glycyrrhiza uralensis* Fisch.) [J]. Sci China Ser C Life Sci, 2009, 52(10): 977–981. doi: 10.1007/s11427-009-0120-6.
- 高文远, 李克峰, 高秀梅, 等. 太空环境对甘草 DNA 诱变作用和次生代谢产物的影响 [J]. 中国科学 C 辑: 生命科学, 2008, 38(11): 1090–1094.