

航天诱变对四种木本花卉幼苗生长与生理特性的影响

胡冰 陈朝黎 曾炳山 李湘阳 陆钊华*

(热带林业研究国家林业和草原局重点实验室/中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东 广州 510520)

摘要: 为研究航天诱变处理对四种木本花卉生长指标及生理生化特性的影响, 利用新一代载人试验飞船搭载凤凰木、蓝花楹、多花红千层、腊肠树种子, 返回地面后进行生长指标、叶片形态、色素含量、生理生化活性等指标的测定。结果表明: 航天诱变处理的凤凰木、腊肠树和蓝花楹群体的平均株高、平均地径、平均叶片数均低于对照组, 红千层高于对照组; 航天诱变处理的凤凰木和腊肠树群体的平均叶面积减小, 蓝花楹和红千层的群体的平均叶面积增大; 航天诱变处理影响了四种木本花卉叶片的总叶绿素平均含量或其组分的变异幅度, 显著提高了凤凰木叶片类胡萝卜素的平均含量; 较大程度地影响了凤凰木和蓝花楹群体的可溶性糖含量的变异幅度、红千层和腊肠树群体的 Pro 含量的变异幅度及四种木本花卉的 PDHA 平均活性及其群体变异幅度; 四种木本花卉均有生长、生理指标与航天诱变处理显著相关。以上结果表明, 航天诱变处理效果因树种自身特性不同而异, 可根据具体变异情况改良四种木本花卉的生长与生理特性, 是木本花卉育种的一种有效途径。

关键词: 航天诱变; 木本花卉; 生长特性; 生理指标; 育种

Effects of Space Treatment on Growth Characteristics of Four Woody Flowers Seedlings

HU Bing CHEN Zhaoli ZENG Bingshan LI Xiangyang LU Zhaohua*

(Key Laboratory of Tropical Forestry Research, National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520)

Abstract: To investigate the effects of space mutation on the growth indexes and physiological and biochemical characteristics of four woody flowers, seeds of *Delonix regia*, *Jacaranda mimosifolia*, *Cassia fistula*, and *Callistemon speciosus* was treated by carrying on the new generation of manned experimental spacecraft, and then returned to ground, we analyzed the growth indicators, leaf morphology, pigment content, physiological and biochemical activities of them. The results showed that: the plant height, ground diameter, number of leaves of the population of *D. regia*, *J. mimosifolia*, *C. fistula* after space mutation were all lower than those of ground control; the leaves of the populations of *J. mimosifolia* and *C. speciosus* were generally reduced, and the leaves of the populations of *D. regia* and *C. fistula* were generally increased after space mutation; the total chlorophyll or its components of the four woody flowers to different degrees, the variation range significantly increased the average content of carotenoids in the leaves of *D. regia*; it greatly affected the variation range of the soluble sugar content in the population of *D. regia* and *J. mimosifolia*, and the variation range of Proline content in the population of *C. speciosus* and *C. fistula*, on the average activity of PDHA and the population variation of the four woody flowers were significantly affected; the growth and physiological indicators of the four woody flowers were significantly correlated with the space mutation treatment. The above results showed that the growth, physiological and

biochemical indexes of the four tree species were significantly affected by space treatment, and the mutation effects on different tree species were different, which is an effective way of woody flower breeding.

Keywords: space mutation, woody flowers, growth characteristics, physiological index, breeding

航天诱变育种, 简称航天育种, 又称太空育种, 是一种结合航天、生物学和农业育种的新型育种技术, 主要将作物种子或诱变材料利用返回式卫星、高空气球或宇宙飞船带上宇宙空间, 在太空特殊的高能粒子辐射、微重力、弱磁场、高真空等空间因素的作用下, 使其产生遗传性变异, 再经地面选育出植物新品种的育种新技术^{[1] [2]}。与传统育种技术相比, 航空育种具有突变频率高、变异范围大、有益突变多、稳定性强等特点, 更易于在较短的时间内培育出高产、优质、高抗等性状的新种质、新品种, 还可以产生自然界不存在的突变资源, 提供丰富的育种材料, 为植物遗传改良和种质创新提供了一条新途径^{[3] -[4]}。从 1987 年首次进行航天诱变研究以来, 我国已开展了 30 多次农作物空间搭载试验, 选育出一大批优质高产的植物新品种^[5]。相比农作物, 木本植物的航天诱变育种起步较晚, 自 2002 年, 才搭载了松树、杨树、桉树^[7]、桑树^[9]、小桐子^[11]等木本植物的种子。

凤凰木 (*Delonix regia*)、蓝花楹 (*Jacaranda mimosifolia*)、腊肠树 (*Cassia fistula*) 为多年生高大落叶乔木, 多花红千层 (*Callistemon speciosus*) 为小乔木。这四种木本花卉花朵颜色鲜艳, 观赏性极佳, 在我国华南地区作为常见的行道树、观赏树或庭院特色树种栽植^{[12] [13]}。目前, 关于这四种木本花卉的研究多集中于园林应用^[14]、育苗^[16]及田间栽培技术^[17]等方面, 未见利用航天诱变育种进行种质资源创新的研究报道。本研究利用新一代载人试验飞船搭载植物四种木本花卉种子进行航天诱变处理, 研究航天诱变对四种木本花卉生长指标、叶片形态、色素含量、生理生化活性等多种生长特性的影响, 并对产生的变异进行评价, 以为四种木本花卉的种质改良和品种选育提供参考, 同时为航天诱变育种应用于林木遗传改良提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

选择优质凤凰木种子 500 g、蓝花楹种子 100 g、红千层种子 100 g、腊肠树种子 100 g 为试验材料。将各树种的种子随机分成 2 份, 一份进行航天诱变处理, 另一份留作地面对照, 于 4℃ 保存。长征五号 B 火箭于 2020 年 5 月 5 日 18 时升空, 在轨飞行约 67 h, 轨道高度约 300-8000 公里, 穿越了范艾伦辐射带, 于 5 月 8 日 13 时 49 分返回地面。2020 年 10 月, 将航天诱变处理后的种子同地面对照于中国林业科学研究院热带林业研究所温室(23°20'N, 113°19'E)进行育苗。对种子进行催芽, 待其萌发后转移至种植袋中, 培养条件为日平均温度约 25℃, 平均湿度约 70%, 自然光照强度约为 6000~7000lx。

1.2 方法

1.2.1 生长特性的测定 利用卷尺和游标卡尺对各树种航天诱变和地面对照的幼苗进行株高、地径、叶长、叶宽的测量, 调查幼苗的叶片或叶轴数, 利用便携式叶面积仪(CI-203, 美国 CID 公司)扫描得到叶片或叶轴的叶面积。每个树种分别随机调查航天诱变和地面对照幼苗各 3 个重复, 每重复 20 株。

1.2.2 色素含量的测定 称取叶片样品 0.5 g, 以 80%丙酮溶液为提取液, 利用分光光度计(UV-2450, 日本岛津公司)分别测定 440 nm、645 nm、663 nm 波长下的吸光值, 参照公式: 叶绿素 a=12.7×A663-2.69×A645; 叶绿素 b=22.9×A645-4.68×A663; 类胡萝卜素=4.7×A440-0.27×(叶绿素 a+叶绿素 b), 计

算样品中的叶绿素和胡萝卜素含量，每个样品设置 6 个重复。

1.2.3 生理生化活性的测定 利用蒽酮比色法测定叶片样品中可溶性糖的含量；利用茚三酮法测定叶片样品中脯氨酸的含量；利用 TTC 法测定根系样品中脱氢酶的活性。每个样品设置 6 个重复。

1.2.4 数据分析 利用 Microsoft Excel 2016 和 IBM SPSS Statistics 19 进行数据统计、ANOVA 单因素方差分析和 Pearson 相关性分析，利用 Turkey HSD 进行事后多重比较，通过 GraphPad Prism 9 作图。

2 结果与分析

2.1 航天诱变处理对四种木本花卉生长指标的影响

通过测定凤凰木、蓝花楹、红千层和腊肠树等四个树种航天诱变处理与地面对照幼苗的生长指标可以看出（表 1），凤凰木和腊肠树处理组的平均株高、平均地径和平均叶片数均显著低于地面对照，群体的最小值和最大值均减小，变异系数发生改变；而红千层处理组的平均株高、平均地径和平均叶片数均极显著高于地面对照，群体最小值和最大值均增大，株高和叶片数的变异系数分别增加了 4.85%和 2.53%，地径的变异系数减小了 7.06%；蓝花楹处理组的株高和地径没有发生显著性变化，群体最小值增加、最大值减小，变异系数分别减小了 38.83%和 32.21%，而叶片数发生极显著减小，群体最小值和最大值均减小，变异系数减小了 12.98%。由图 1 得出，凤凰木、腊肠树和蓝花楹群体整体表现为负向变化，而红千层群体整体表现为正向变化。以上结果表明，经航天处理后，四个树种的株高、地径、叶片数等生长指标均受到明显影响，不同树种对航天诱变处理的响应程度有所不同。

表 1 航天处理后四种木本花卉生长指标的测定

Table1 Effects of space treatment on plant growth properities of four species of woody ornamental plants

树种	处理	株高(cm)	最小值(cm)	最大值(cm)	变异系数(%)
Species	Treatment	Plant height	Minimum	Maximum	Coefficient of variation
凤凰木	CK	68.29±10.22	45.5	90.8	14.97
	ST	50.71±8.68 **	39.4	67.9	17.12
蓝花楹	CK	46.71±11.69	31.6	77.2	25.03
	ST	45.57±6.98	35.9	62.1	15.31
红千层	CK	34.64±4.14	27.2	42.6	11.95
	ST	57.13±7.16 **	39.1	69.3	12.53
腊肠树	CK	44.03±11.39	17.2	62.1	25.87
	ST	24.15±6.99 **	14.6	38.2	28.93
树种	处理	地径(mm)	最小值(mm)	最大值(mm)	变异系数(%)
Species	Treatment	Ground diameter	Minimum	Maximum	Coefficient of variation
凤凰木	CK	8.65±1.31	7.37	12.58	15.20
	ST	7.68±0.66 **	6.40	8.90	8.61
蓝花楹	CK	5.67±0.74	4.53	7.20	13.10
	ST	5.60±0.50	4.76	6.44	8.88
红千层	CK	2.57±0.42	1.82	3.23	16.30
	ST	3.53±0.53 **	2.58	4.98	15.15
腊肠树	CK	4.69±1.21	1.53	6.93	25.90

	ST	3.77±0.66 **	2.59	5.08	17.42
树种	处理	叶片数	最小值	最大值	变异系数(%)
Species	Treatment	Number of blades	Minimum	Maximum	Coefficient of variation
凤凰木	CK	21.4±3.5	17	28	16.53
	ST	19.4±2.4 *	13	24	12.56
蓝花楹	CK	37.6±5.7	32	50	15.10
	ST	32.8±4.3 **	18	38	13.14
红千层	CK	40.6±11.2	24	76	27.66
	ST	88.5±25.1 **	51	162	28.36
腊肠树	CK	15.9±3.2	10	21	20.40
	ST	10.8±3.9 **	2	17	35.76

注：数据表示为均值±标准差，CK 表示地面对照；ST 表示航天处理， *表示 0.05 水平差异；**表示 0.01 水平差异。

Note:

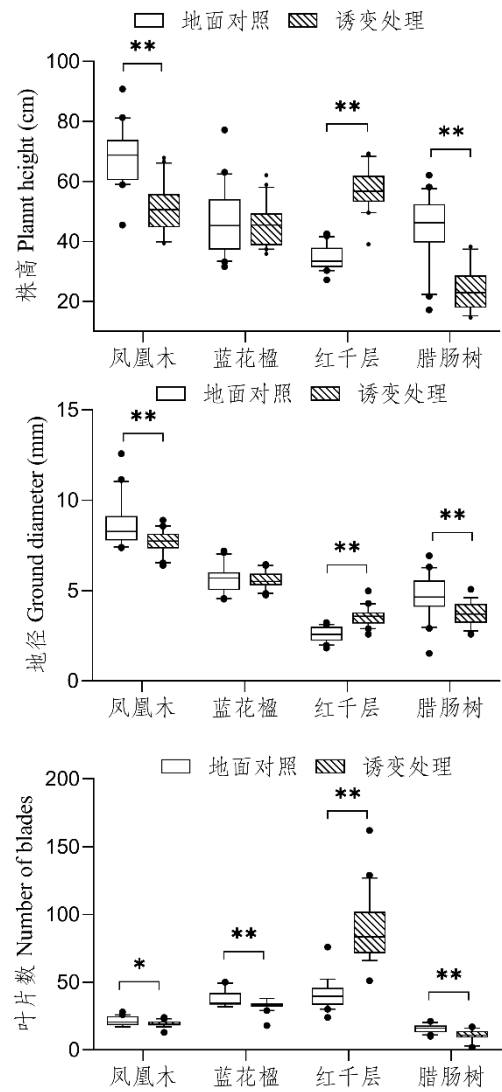


图1 航天诱变处理后四种木本花卉生长指标的变化

2.2 航天诱变处理对四种木本花卉叶片形态的影响

由于凤凰木、蓝花楹为二回羽状复叶，选择以叶轴为单位测定其叶形参数。通过测定凤凰木、蓝花楹、红千层、腊肠树四种木本花卉的航天处理与地面对照幼苗的叶（轴）长、叶（轴）宽、叶（轴）面积等参数可以得出（表2），航天诱变处理后，凤凰木的叶轴长、叶轴宽、叶轴长/宽和叶轴面积均极显著减小，各指标的群体最小值和最大值均减小，叶轴长、叶轴宽和叶轴面积的变异系数分别增大了10.19%、12.60%和54.14%；腊肠树的叶长、叶宽和叶面积也发生极显著性减小，其叶长、叶宽和叶长/叶宽的变异系数分别增加了32.90%、20.73%和12.47%；蓝花楹和红千层类似，其平均叶（轴）长、平均叶（轴）长/宽和平均叶（轴）面积均极显著增加（由于红千层幼苗的叶片狭小且叶柄极短，无法利用叶面积仪获取叶面积，故其叶面积数据缺失），而平均叶（轴）宽无明显差异，且其变异系数多表现为降低。由图2可知，航天诱变处理后，不同树种的叶形参数变化程度不同，凤凰木和腊肠树群体的叶片普遍减小，蓝花楹和红千层的群体的叶片普遍增大。

表2 航天处理后四种木本花卉叶形参数的测定

Table2 Effects of space treatment on leaf shape parameters of four species of woody ornamental plants

树种	处理	叶（轴）长(cm)	最小值(cm)	最大值(cm)	变异系数(%)
Species	Treatment	leaf length	Minimum	Maximum	Coefficient of variation
凤凰木	CK	30.05±5.90	15.45	44.56	19.62
	ST	21.56±4.66 **	12.12	31.00	21.62
蓝花楹	CK	8.18±2.76	2.09	14.60	33.75
	ST	10.34±3.06 **	1.95	18.51	29.63
红千层	CK	4.51±0.60	3.30	5.80	13.41
	ST	5.36±0.63 **	4.00	7.20	11.68
腊肠树	CK	3.76±0.78	1.80	5.20	20.64
	ST	3.28±0.90 **	1.60	5.00	27.43
树种	处理	叶（轴）宽(cm)	最小值(cm)	最大值(cm)	变异系数(%)
Species	Treatment	leaf width	Minimum	Maximum	Coefficient of variation
凤凰木	CK	7.95±1.46	4.10	11.71	18.34
	ST	6.73±1.39 **	3.38	10.16	20.65
蓝花楹	CK	3.49±1.56	1.00	12.08	44.64
	ST	3.61±0.80	2.44	7.35	22.19
红千层	CK	0.56±0.08	0.30	0.70	14.59
	ST	0.58±0.11	0.40	0.80	18.46
腊肠树	CK	1.63±0.37	0.60	2.20	22.58
	ST	1.39±0.38 **	0.80	2.70	27.26
树种	处理	叶（轴）长/叶（轴）宽	最小值	最大值	变异系数(%)
Species	Treatment	leaf length/width	Minimum	Maximum	Coefficient of variation
凤凰木	CK	3.91±1.11	1.79	7.40	28.32
	ST	3.26±0.64 **	1.77	4.68	19.73
蓝花楹	CK	2.50±0.83	0.69	4.32	33.09
	ST	2.94±0.87 **	0.65	4.96	29.72
红千层	CK	8.16±1.50	5.83	12.33	18.37

腊肠树	ST	9.44±1.46 **	6.50	12.75	15.45
	CK	2.33±0.32	1.64	3.38	13.71
	ST	2.39±0.37	0.70	3.54	15.42
树种	处理	叶（轴）面积(cm ²)	最小值(cm ²)	最大值(cm ²)	变异系数(%)
Species	Treatment	leaf area	Minimum	Maximum	Coefficient of variation
凤凰木	CK	122.65±31.24	63.03	203.49	25.47
	ST	81.42±31.96 **	34.92	167.55	39.26
蓝花楹	CK	14.35±6.35	2.44	29.64	44.21
	ST	19.71±7.58 **	3.87	47.02	38.46
腊肠树	CK	4.16±1.69	0.90	8.09	40.74
	ST	2.82±1.12 **	1.04	5.22	39.78

注：数据表示为均值±标准差，CK 表示地面对照；ST 表示航天处理， *表示 0.05 水平差异；**表示 0.01 水平差异。

Note:

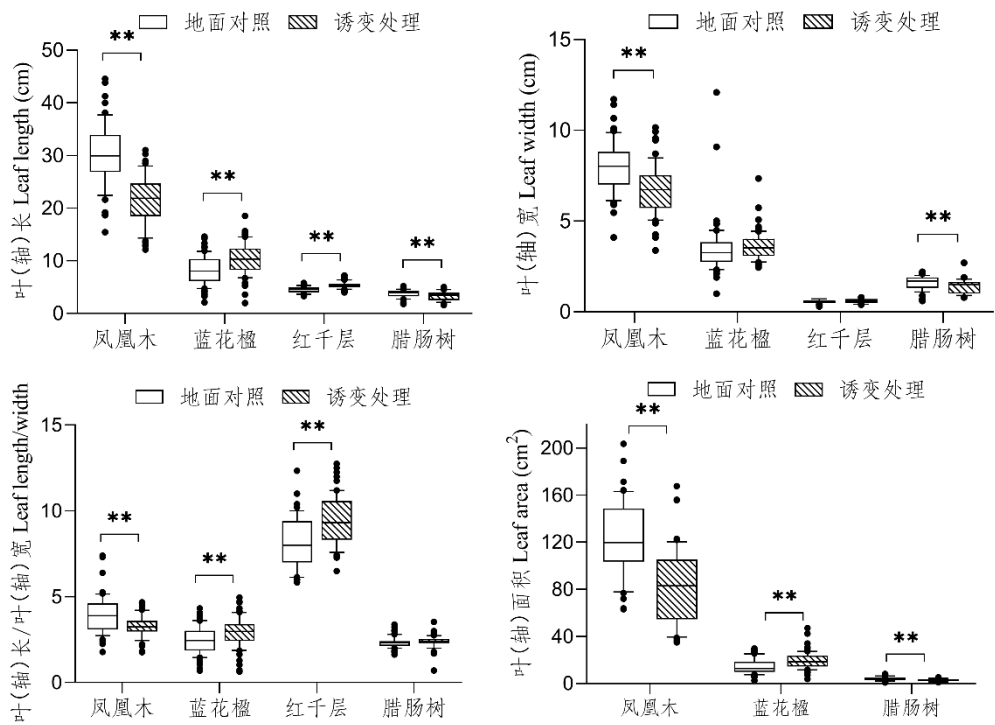


图 2 航天诱变处理后四种木本花卉叶形参数的变化

2.3 航天诱变处理对四种木本花卉色素含量的影响

叶绿素和类胡萝卜素是植物光合作用中吸收和传递光能的重要色素，类胡萝卜素在强光下还可以保护叶绿素免遭伤害。对凤凰木、蓝花楹、红千层、腊肠树四种木本花卉的航天处理与地面对照幼苗叶片的叶绿素和类胡萝卜素进行测定得出（图 3），经航天处理后，凤凰木、腊肠树叶片的叶绿素平均含量略有降低；红千层叶片的叶绿素平均含量略有增加；而蓝花楹叶片的叶绿素平均含量无明显变化，这些表现均未达到显著水平。就变异系数而言，经航天处理后，凤凰木和红千层叶片总叶绿素含量和叶绿素 b 含量的变异幅度较小，叶绿素 a 含量的变异系数分别相对增加了 14.46 %和减小了 44.58 %；而腊肠树叶片总叶绿素含量和叶绿素 a 含量的变异幅度较小，叶绿素 b 含量的变异系数却相对增加了 28.22 %；蓝花楹的总叶绿素

含量、叶绿素 a 含量和叶绿素 b 含量的变异幅度均增大, 分别相对增加了 28.34 %、9.33 %和 10.94 %。经航天处理后, 凤凰木叶片的类胡萝卜素平均含量显著增加, 但变异幅度减小, 变异系数相对减小了 24.09 %; 蓝花楹、红千层、腊肠树叶片的类胡萝卜素平均含量无明显变化, 其中腊肠树叶片类胡萝卜素含量的变异系数相对增加了 19.26 %, 蓝花楹和红千层的变异系数无明显改变。由此可见, 航天处理不同程度地影响了四种木本花卉的总叶绿素或其组分的变异幅度, 并显著提高了凤凰木叶片类胡萝卜素的平均含量。

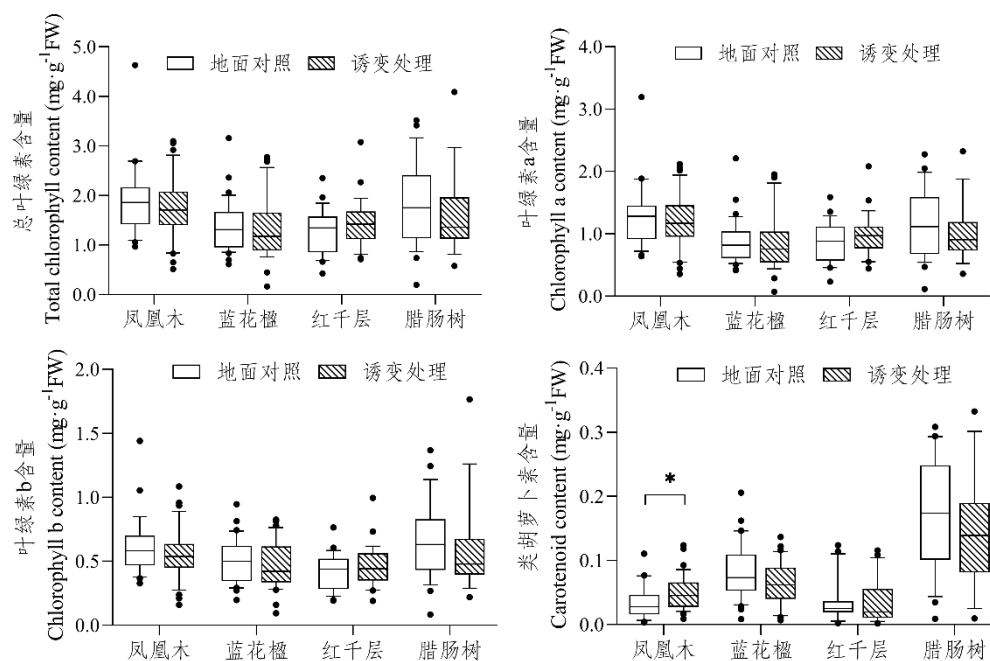


图3 航天诱变处理后四种木本花卉叶片色素含量的变化

2.3 航天诱变处理对四种木本花卉生理生化活性的影响

可溶性糖含量、Pro 含量和 PDHA 的活性均是反映植物的代谢活力和抗逆能力的重要指标。由图 4 可知, 经航天处理后, 凤凰木、蓝花楹和红千层的可溶性糖平均含量均提高, 其中凤凰木的变化达到显著水平, 而变异系数分别相对减小了 26.20 %、21.38 %和 7.05 %; 经航天处理后, 腊肠树的可溶性糖平均含量有所降低, 且其变异系数也相对降低了 4.50 %。经航天处理后, 凤凰木和蓝花楹的 Pro 平均含量均增加, 其中蓝花楹的变化达到极显著水平, 但其变异系数分别相对增加了 17.04 %和降低了 3.17 %; 航天处理使得红千层 Pro 平均含量显著性降低, 其变异系数相对增加了 159.51 %; 而腊肠树的 Pro 平均含量无明显变化, 但其变异系数相对降低了 75.49 %。航天处理显著影响了凤凰木、蓝花楹、红千层和腊肠树的 PDHA 活性, 其中凤凰木、蓝花楹和腊肠树 PDHA 的平均活性极显著降低, 其变异系数分别相对增加了 120.76 %、55.45 %和 38.46 %; 红千层 PDHA 的平均活性极显著增加, 但其变异系数相对降低了 39.07 %。因此, 航天处理影响了四种木本花卉的 PDHA 平均活性及其群体变异幅度, 影响了凤凰木和蓝花楹群体的可溶性糖含量的变异幅度及红千层和腊肠树群体的 Pro 含量的变异幅度。

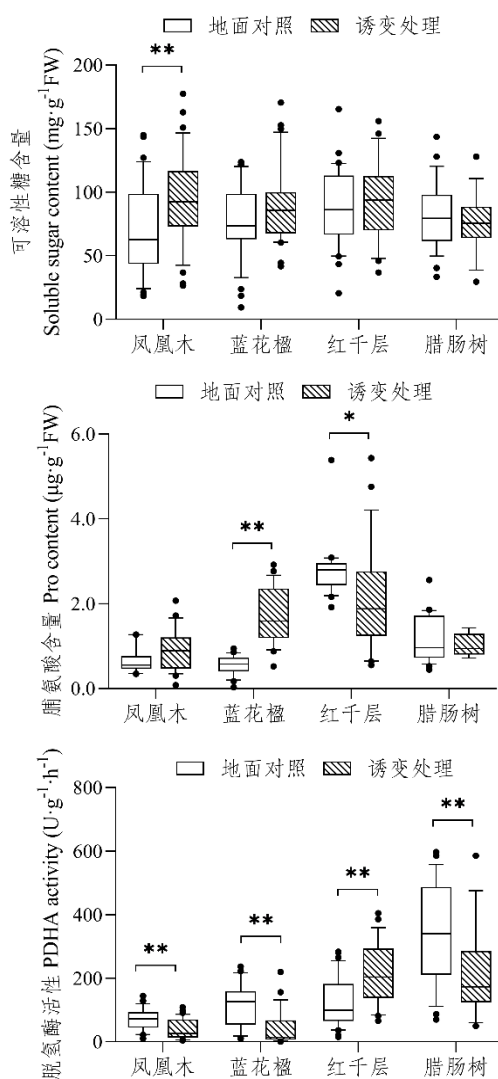


图4 航天诱变处理后四种木本花卉生理生化活性指标的变化

2.5 航天诱变处理对四种木本花卉形态与生理生化活性的相关性分析

为探讨航天诱变对四种木本花卉植株形态及生理生化活性的综合影响,对航天诱变处理与地面对照四种木本花卉的生长指标、叶片形态、色素含量及生理生化活性等进行 Pearson 法相关性分析。由表 3 可知,四种木本花卉的株高、地径、叶片数、叶长、PDHA 均与航天诱变处理显著或极显著相关。凤凰木的类胡萝卜素与株高、叶片长宽比、叶面积显著或极显著负相关,Pro 含量与叶片数和叶片显著或极显著相关;蓝花楹的 Pro 与叶片数极显著负相关,与叶长、长宽比和叶面积显著相关,PDHA 与叶面积极显著相关;红千层叶绿素 a 与总叶绿素极显著相关,Pro 与株高显著负相关,PDHA 与株高、地径极显著相关;腊肠树的叶面积与总叶绿素、叶绿素 a、叶绿素 b 极显著相关,PDHA 与株高、胸径显著相关,表明植株的生长形态的变化与其生理指标的变化密切相关。总的来说,航天诱变处理与凤凰木、蓝花楹、腊肠树的生长指标、叶片形态和生理生化活性指标间多为负相关关系,而与红千层的的多项指标为正相关关系,表明航天诱变处理影响了凤凰木、蓝花楹、腊肠树正常生长,使其发生负向变异;但促进了红千层的生长性状,提高其抗逆性,使其发生正向变异。

表 3 航天处理及地面对照四种木本生长性状与生理生化指标的相关性分析

Table3 Effects of space treatment on leaf shape parameters of four species of woody ornamental plants

树种	指标	航天	株高	地径	叶片数	叶长	叶宽	长宽比	叶面积	总叶绿素	叶绿素 a	叶绿素 b	类胡萝卜素	可溶性糖	Pro	PDHA
凤凰木	编号		1													
	株高		-0.69**	1												
	地径		-0.43**	0.50**	1											
	叶片数		-0.31*	0.42**	0.47**	1										
	叶长		0.89**	-0.59**	-0.40*	-0.33*	1									
	叶宽		0.75**	-0.29	-0.24	-0.16	0.76**	1								
	长宽比		-0.94**	0.72**	0.44**	0.36*	-0.80**	-0.71**	1							
	叶面积		-0.55**	0.76**	0.41**	0.34*	-0.23*	-0.16	0.72**	1						
	总叶绿素		-0.13	0.11	-0.20	-0.10	-0.08	-0.00	0.14	0.18	1					
	叶绿素 a		-0.12	0.11	-0.19	-0.09	-0.08	0.01	0.13	0.17	0.99**	1				
	叶绿素 b		-0.14	0.10	-0.21	-0.14	-0.08	-0.03	0.15	0.21	0.97**	0.94**	1			
	类胡萝卜素		0.28*	-0.41**	-0.26	-0.11	0.21	0.13	-0.25*	-0.31*	-0.05	-0.08	0.02	1		
	可溶性糖		-0.13	0.23	-0.06	0.00	-0.06	0.08	0.12	0.16	0.05	0.06	0.02	-0.23	1	
	Pro		0.30*	-0.30	-0.36*	-0.44**	0.30*	0.12	-0.28	-0.26	0.02	0.03	-0.02	0.19	-0.15	1
	PDHA		-0.45**	0.24	0.21	0.12	-0.31*	-0.34**	0.43**	0.40**	0.03	0.03	0.03	-0.09	0.17	-0.06
蓝花楹	编号		1													
	株高		-0.05	1												
	地径		-0.04	0.26	1											
	叶轴数		-0.45**	0.24	0.03	1										
	叶长		0.34**	-0.17	-0.09	-0.06	1									
	叶宽		0.05	0.07	0.00	0.12	.30**	1								
	长宽比		0.24**	-0.22	-0.08	-0.16	.72**	-0.36**	1							
	叶面积		0.37**	-0.21	-0.18	-0.17	.78**	0.46**	0.29**	1						
	总叶绿素		-0.06	-0.14	-0.13	0.01	0.06	0.03	0.10	-0.002	1					
	叶绿素 a		-0.01	-0.13	-0.11	-0.00	0.10	0.03	0.13	0.03	0.99**	1				
	叶绿素 b		-0.11	-0.14	-0.17	0.03	0.04	0.09	0.02	0.00	0.96**	0.92**	1			
	类胡萝卜素		-0.21	-0.14	-0.06	-0.11	-0.05	0.04	-0.16	0.11	0.14	0.13	0.17	1		
	可溶性糖		0.09	-0.07	0.02	0.16	0.24	0.08	0.21	0.12	-0.02	-0.03	0.00	0.02	1	
	Pro		0.70**	-0.06	-0.00	-.44**	0.31*	0.01	0.28*	0.30*	-0.11	-0.10	-0.13	-0.04	0.06	1

	PDHA	0.51**	-0.18	-0.01	-0.26	0.20	0.13	0.02	0.41**	0.03	0.06	-0.05	0.06	0.24	0.20	1
红千层	编号	1														
	株高	.89**	1													
	地径	.71**	0.83**	1												
	叶片数	.79**	0.82**	0.80**	1											
	叶长	.57**	0.73**	0.57**	0.67**	1										
	叶宽	0.09	-0.22	-0.15	0.04	0.38**	1									
	长宽比	.40**	0.67**	0.52**	0.40*	0.44**	-0.65**	1								
	总叶绿素	0.18	0.10	0.02	0.16	0.05	-0.001	0.04		1						
	叶绿素 a	0.17	0.10	0.03	0.15	0.03	-0.02	0.05		0.996**	1					
	叶绿素 b	0.18	0.10	0.01	0.17	0.08	0.04	0.03		0.98**	0.96**	1				
	类胡萝卜素	-0.03	0.04	0.07	0.13	0.04	0.10	-0.06		0.17	0.18	0.14	1			
	可溶性糖	0.10	0.24	0.23	0.21	0.08	-0.01	0.04		-0.04	-0.04	-0.04	-0.09	1		
	Pro	-.47**	-0.36*	-0.14	-0.26	-0.24	0.08	-0.23		0.05	0.06	0.04	0.004	-0.22	1	
	PDHA	.50**	0.33*	0.22	0.33*	0.32*	0.17	0.10		0.18	0.18	0.18	-0.08	0.23	-0.30*	1
腊肠树	编号	1														
	株高	-.73**	1													
	地径	-.43**	0.53**	1												
	叶片数	-.59**	0.63**	0.33*	1											
	叶长	-.28**	0.24	0.08	0.24	1										
	叶宽	-.31**	0.22	0.12	0.15	0.78**	1									
	长宽比	0.09	0.19	-0.01	0.28	0.23*	-0.39**	1								
	叶面积	-.41**	0.41**	0.45**	0.28	0.07	0.04	0.05	1							
	总叶绿素	-0.09	0.10	0.30	-0.02	-0.01	-0.01	-0.02	0.46**	1						
	叶绿素 a	-0.12	0.10	0.31	-0.04	0.01	0.01	-0.03	0.45**	0.99**	1					
	叶绿素 b	-0.05	0.09	0.26	0.02	-0.03	-0.04	0.01	0.45**	0.97**	.93**	1				
	类胡萝卜素	-0.14	0.05	0.09	0.01	-0.10	-0.09	0.00	0.28	0.41*	.39*	0.42**	1			
	可溶性糖	-0.13	0.04	0.28	0.17	0.21	0.06	0.26	0.07	-0.03	-0.03	-0.03	-0.08	1		
	Pro	-0.10	0.20	0.34	0.15	-0.17	-0.16	-0.09	0.16	0.34	0.30	0.38*	0.08	-0.30	1	
	PDHA	-.38*	0.37*	0.40*	0.26	0.25	0.16	0.17	0.22	0.35*	.034*	0.35*	0.19	0.03	0.29	1

注： *表示 0.05 水平差异； **表示 0.01 水平差异。

Note:

3 讨论

航天诱变处理诱导四种木本花卉的生长指标、叶片指标发生变化,对于高大乔木凤凰木、蓝花楹、腊肠树而言,生长指标表现为负向变化,而小乔木红千层群体整体表现为正向变化,叶形参数凤凰木和腊肠树群体叶片普遍减小,蓝花楹和红千层群体叶片普遍增大表明不同树种对航天诱变处理的响应程度不同。姜静等研究太空环境对白桦苗高的影响,发现4个不同家系的白桦均表现出矮化现象^[18],航空诱变处理后的文冠果和刺槐早期的苗高也低于地面对照组^[8],赣早粳47号经航空诱变后株高优于地面对照组^[19]。这些研究结果均表明太空诱变可以引起高频的变异发生,但不同植物对于诱变的表现规律不同。这些变异可能是因为特殊的太空环境使植物体内遗传物质的结构发生改变,使细胞紊乱,植物的生长发育和信号转导等生理生化过程受到影响,使植物遗传性状改变。但是宋兴舜等对航天诱变处理1月龄和6月龄的大青杨生长状态与地面植株比较发现,1月龄大青杨幼苗略高于同时期的地面对照,生长到6个月时,其株高、最大叶长、最大叶宽等指标均小于地面对照组^[29],路超^[8]等和李允菲^[20]关于空间诱变处理后不同株龄的五角枫的研究结果也表明,航天诱变处理使五角枫幼苗在幼苗期生长缓慢,但随着时间的延长,航天诱变五角枫的生长逐渐优于对照组。这可能是因为航天诱变对植株株高的抑制/促进作用可能会随着地面生长环境的影响使空间诱变的优势/劣势逐渐削弱或消失,航天诱变是一个很复杂的过程,且不同植物材料表现不同。

叶绿素是存在于叶绿体中的植株色素,具有捕获光能的独特能力,并可以利用水分子的光解来补充细胞的还原能力,在光合作用中具有举足轻重的作用^[21]。本研究中秋天诱变不同程度地影响了四种木本花卉叶绿素和类胡萝卜素的变异幅度,除凤凰木叶片的类胡萝卜素平均含量显著增加外,其他植株的平均含量的差异均为达到显著水平。姜静等对航空诱变处理的1年生白桦苗木进行叶绿素含量测定,结果与我们的研究一致,航天处理与叶面对照的叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素均无显著性差异,刘梅等对航空诱导玉米SP1的研究也出现了类似的结果^[22],而航天诱变使刺槐的总叶绿素和叶绿素b含量显著降低,叶绿素a/b值增加^[23],航天诱变的五角枫叶绿素a,叶绿素b,总叶绿素含量均显著或极显著高于地面对照^[20]。由于叶绿素和类胡萝卜素含量与光合能力和抗性大小有关^[24],这同样表明不同物种在航天诱变环境下具有不同的反应模式。

由于宇宙环境极其特殊复杂,物理因素众多,细胞壁重塑、氧化应激、防御反应和光合作用是在太空飞行条件下生长的植物中常见的改变过程^[25]。本研究中秋天处理使四种木本花卉的可溶性糖含量、Pro含量 and PDHA的活性及群体变异幅度均有不同程度的变化。可溶性糖在各种代谢反应中发挥重要作用,作为参与调节光合作用、渗透物质合成和蔗糖代谢的不同基因表达的信号,可溶性糖会随压力因素而改变^[26]。本研究经航天处理后,凤凰木、蓝花楹和红千层的可溶性糖平均含量均提高,腊肠树的可溶性糖平均含量有所降低,表明航空环境使得4种木本花卉均受到了环境压力,改变了植物体内的代谢模式。脯氨酸是植物生长发育过程中的重要信号分子,参与植物渗透调节、抗氧化等过程,植物遭遇逆境胁迫时Pro含量通常大幅度增加^[27],凤凰木和蓝花楹的Pro平均含量均增加,表明航空环境一定程度上给与植株一定程度的胁迫作用。PDHA的活性很大程度上反应了生物体的活性状态,能直接表示生物细胞对其基质降解能力的强弱^[28]。本研究中秋天诱导凤凰木、蓝花楹和腊肠树的PDHA平均活性极显著降低,可能是航天诱导对凤凰木、蓝花楹和腊肠树等三种树种对空间环境的影响较为敏感,受到空间环境的胁迫作用后,均受到不同程度的损伤。前人关于其他物种逆境相关指标(如MDA、SOD、POD、可溶性蛋

白、APX) 的研究[8] [18] [20] [29] 也表明太空环境可能改变了植物的生理生化特性, 从而影响植物在地面上的生长发育, 加快育种进程。

然而, 本研究所进行的研究多为生长发育和生理特性的直观探究, 太空环境改变植株的株高、地径、叶片指标、色素含量和生理代谢过程可能是因为太空环境使 DNA 损伤, 改变了植物的染色体结构, 进而影响了植株的生长进程, 关于航天诱变的机理的研究并未涉及, 此外, 本研究集中关注了航空诱变对四种木本花卉早期的影响及评价, 关于后期植株的株型、抗性、叶形、叶期等特征以及花色、花形、花期的变异还需要进一步持续关注。今后还应加强对航天诱变植株突变株型的选择, 并通过无性繁殖技术的研究, 对诱变的有益变异进行固定和利用。

4 结论

综上所述, 航空诱变使凤凰木、蓝花楹、腊肠树群体的平均株高、平均地径、平均叶片数均降低, 使红千层增高; 不同程度的影响了四种木本花卉的色素含量, 其中凤凰木叶片类胡萝卜素的平均含量显著提高, 表明航天诱变影响了植株的光合作用; 影响了凤凰木和蓝花楹群体可溶性糖含量的变异幅度, 红千层和腊肠树群体的 Pro 含量的变异幅度, 改变了其抗逆能力; 对四种木本花卉的 PDHA 平均活性及其群体变异幅度的影响均较大, 改变了植株的活性状态。航天诱变处理与凤凰木、蓝花楹、腊肠树的多项生长和生理生化指标负相关, 与红千层的多项生长和生理生化指标正相关, 表明航天诱变处理对植株的诱变反应较为复杂, 会导致植株发生多种类型的变异。

参考文献:

- [1] Mohanta, T. K., Mishra, A. K., Mohanta, Y. K., & Al-Harrasi, A. Space breeding: the next-generation crops. *Frontiers in plant science*, 2021, 12.
- [2] 王乃彦. 开展航天育种的科学研究工作, 为我国农业科学技术的发展做贡献[J]. *核农学报*, 2002(5): 257-260.
- [3] Jiang, L., Zhang, B., Chen, W., Qiu, T., Wang, L., & Yang, S. Space breeding in modern agriculture. *American Journal of Agricultural Research*, 2020, 5.
- [4] 崔彬彬, 孙宇涵, 李云. 木本植物航天诱变育种研究进展[J]. *核农学报*, 2013, 27(12): 1853-1857.
- [5] 陈志强, 周丹华, 郭涛, 王慧. 植物航天育种的发展及其展望[J]. *卫星应用*, 2021(12): 19-24.
- [6] 马建华, 赵广球, 杨正辉, 祁树安, 陈兰海, 孙巨青. 航天育种及其在林业上的应用前景[J]. *山东林业科技*, 2005(03): 76-77.
- [7] 黄宏健, 徐建民, 李宝琦, 陆钊华, 李光友, 胡杨, 谭沛涛, 叶棠, 梁慧霞. 太空诱变对桉树家系苗期及田间生长的影响[J]. *林业科技*, 2010, 35(02): 1-4.
- [8] 路超, 袁存权, 李云, 习洋. 3 种木本植物种子航天诱变研究初报[J]. *核农学报*, 2010, 24(06): 1152-1157.
- [9] 罗国庆, 唐翠明, 吴福泉, 杨琼, 廖森泰. 桑树种子航天诱变试验[J]. *蚕业科学*, 2006(03): 403-406.
- [10] 张利国, 张效秋, 施汉钰. 航天诱变大青杨形态指标测定与分析[J]. *中国林副特产*, 2010(04): 26-28.
- [11] 何明霞, 胡庭兴, 费世民, 杨清. 航天搭载小桐子种子 SP₁ 的生物学效应[J]. *江苏农业科学*, 2010(03): 233-235.
- [12] 黄嘉琦. 气候变化背景下火焰树等五种外来园林树木在我国的引种适宜性分析[D]. 仲恺农业工程学院, 2020.
- [13] 李扬, 刘平, 谢军, 王丹丹. 观赏红千层的栽培技巧及在园林景观中的应用[J]. *山西农经*, 2020(23): 69-70.
- [14] 唐品川. 广州市绿道系统木本植物多样性与主要生长指标特征研究[D]. 安徽农业大学, 2021: 28-32.
- [15] 王彬. 广州市增城区中心城区道路绿化优化策略研究[D]. 华南理工大学, 2020: 39-42.
- [16] 张国武, 殷琪, 李蕊萍, 刘学锋, 许宇星, 邓小梅. 蓝花楹组织培养研究[J]. *林业与环境科学*, 2016, 32(6): 59-62.
- [17] 索伟伟. 红千层花卉引种及繁育技术[J]. *现代园艺*, 2014(10): 45.
- [18] 姜静, 姜莹, 杨传平, 郭敏, 李开隆, 刘桂丰, 李慧玉. 白桦航天诱变育种研究初报[J]. *核农学报*, 2006(1): 27-31.

- [19] 李源祥,李金国,杨新喜,蒋兴村,华育坚,黎二妹,赣早粳 47 号亲本空间诱变的性状变异研究[J].航天医学与医学工程,2002(02):127-131.
- [20] 李允菲,杨帆,任云辉,赵心音,郭倍倍,孙宇涵,李云,王仁涛,张媛,谷雯雪,路超.空间飞行对五角枫植株生理指标及抗氧化酶的影响[J].核农学报,2012,26(4):660-665.
- [21] Hu X, Gu T, Khan I, et al. Research progress in the interconversion, turnover and degradation of chlorophyll[J]. Cells, 2021, 10(11): 3134.
- [22] 刘梅,史振声.卫星搭载处理对玉米 SP_1 代诱变效应研究[J].玉米科学,2009,17(3):51-54.
- [23] 袁存权,李云,路超,杨敏生,张玉瑶.刺槐种子航天诱变生物学效应研究[J].核农学报,2010,24(6):1141-1147.
- [24] Dharni N, Cazzonelli C I. Environmental impacts on carotenoid metabolism in leaves[J]. Plant Growth Regulation, 2020, 92(3): 455-477.
- [25] Manzano A, Carnero-Diaz E, Herranz R, et al. Recent transcriptomic studies to elucidate the plant adaptive response to spaceflight and to simulated space environments[J]. iScience, 2022: 104687.
- [26] Rosa, M., Prado, C., Podazza, G., Interdonato, R., González, J. A., Hilal, M., & Prado, F. E. Soluble sugars: Metabolism, sensing and abiotic stress: A complex network in the life of plants. Plant signaling & behavior, 2009, 4(5), 388-393.
- [27] Kaur, G., & Asthir, B. J. B. P. (2015). Proline: a key player in plant abiotic stress tolerance. Biologia plantarum, 59(4), 609-619.
- [28] 李今,吴振斌,贺锋.生物膜活性测定中 TTC-脱氢酶活性测定法的改进[J].吉首大学学报(自然科学版),2005(1):37-39.
- [29] 宋兴舜,吴迪,刘雪梅,李开隆,宋福南,杨传平.大青杨航天诱变植株早期抗氧化酶生化指标测定[J].林业科学,2009,45(7):145-149.