DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201708007
引文格式: 张俊杰, 韦霄, 吴少华, 等. 金丝李果实、种子形态分化及外源物质对种子萌发和幼苗生长的影响 [J]. 广西植物, 2018, 38(4):509-520
ZHANG JJ, WEI X, WU SH, et al. Morphological differentiation of *Garcinia paucinervis* fruits and seeds and effects of exogenous substances on its seed germination and seedling growth [J]. Guihaia, 2018, 38(4):509-520

金丝李果实、种子形态分化及外源物质对种子萌发和幼苗生长的影响

张俊杰[1,2], 韦 霄[2], 吴少华[1*], 柴胜丰[2], 吕仕洪[2], 韩 愈[2,3]

(1. 福建农林大学 园艺学院, 福州 350002; 2. 广西壮族自治区中国科学院 广西植物研究所, 广西 桂林 541006;
3. 广西师范大学 生命科学学院, 广西 桂林 541004)

摘 要: 通过采集3个天然种群的金丝李(*Garcinia paucinervis*)果实,观察果实和种子的形态性状,分析其种群内和种群间的形态分化,观察不同种群种子萌发和幼苗生长的规律;采用四种植物生长调节剂和两种化学药剂,研究浸种对金丝李种子萌发和幼苗生长的影响。结果表明:金丝李种子长2.48~3.08 cm、宽1.49~1.67 cm、百粒重392.50~438.18 g;3个种群果实和种子已产生明显的形态分化,胡润种群多数表型性状值在3个种群中最小,安宁种群的果实和种子偏圆,弄岗种群偏窄;在种群内部,果实和种子重量的分化较显著,整体形态较稳定;在萌发过程中,种子留存,不定根逐渐取代胚根成为主根;3个种群的萌发过程均缓慢,中间阶段几乎停滞,出苗极不整齐,萌发率表现为安宁种群(78.33%)>弄岗种群(55%)>胡润种群(48.33%),种子存在休眠;从种子萌发来看,以80 mg·L^{-1}的6-BA浸种24 h处理效果最好,萌发时滞最短、萌发率最高、平均萌发时间最短;结合幼苗生长情况来看,10~50 mg·L^{-1}的6-BA和500 mg·L^{-1}的GA_3处理均适宜,以50 mg·L^{-1}的6-BA效果最佳。低浓度的KNO_3和NH_4NO_3能提高萌发率,但未显著加快萌发进程,IAA和NAA对种子萌发和幼苗生长有抑制作用。该研究结果为金丝李的遗传多样性提供了形态学资料,为更好地保护、开发和利用这一珍贵树种提供了科学依据。

关键词: 濒危植物, 种子萌发, 植物生长调节剂, 种子休眠, 形态分化, 幼苗生长
中图分类号: Q945.34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2018)04-0509-12

Morphological differentiation of *Garcinia paucinervis* fruits and seeds and effects of exogenous substances on its seed germination and seedling growth

ZHANG Junjie[1,2], WEI Xiao[2], WU Shaohua[1*], CHAI Shengfeng[2], LÜ Shihong[2], HAN Yu[2,3]

(1. *College of Horticulture, Fujian Agriculture and Forestry University*, Fuzhou 350002, China; 2. *Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences*, Guilin 541006, Guangxi, China;
3. *College of Life Sciences, Guangxi Normal University*, Guilin 541004, Guangxi, China)

收稿日期: 2017-08-27
基金项目: 广西自然科学基金(2015GXNSFDA13915); 广西科技基地和人才专项(桂科 AD17129022) [Supported by Natural Science Foundation of Guangxi (2015GXNSFDA13915); Guangxi Science and Technology Base and Special Fund for Talents(AD17129022)]。
作者简介: 张俊杰(1984-),男,广西柳州人,博士研究生,主要从事观赏园艺资源保护研究,(E-mail)junjieliuzhou@163.com。
*通信作者: 吴少华,教授,博士研究生导师,主要从事观赏园艺及景观规划研究,(E-mail)wsh6677@hotmail.com。

Abstract: Based on three natural populations of *Garcinia paucinervis*, the morphological characters of fruits and seeds were observed and measured, morphological differentiations within and among different populations were analyzed, then the laws of seed germination and seedling growth were observed, and the effects of four plant growth regulators and two chemicals on seed germination and seedling growth were studied as well. The results showed that the lengths and widths of *G. paucinervis* seeds were 2.48-3.08 cm and 1.49-1.67 cm, respectively. The hundred seed weight was 392.50-438.18 g. There were evident morphological differentiations among fruits and seeds of three populations, and most of phenotypic traits of HR (Hurun Town) population were the smallest among three populations. The fruits and seeds of AN (Anning Township) population were rounder, nevertheless which of NG (Nonggang Nature Reserve) population were slenderer. Within populations, the differentiations of fruit and seed weight had relatively evident characters, while their overall shapes had relatively stable characters. The seeds were preserved during seed germination, and adventitious roots eventually replaced the radicles and then became taproots gradually. The germination processes of three populations were slow, the intermediate stages of the processes were almost stagnant, and the emergences of seedlings were very irregular. The order of germination rate of three populations was AN(78.33%)>NG(55%)>HR(48.33%). Therefore, the seeds of *G. paucinervis* had dormancy characteristics. In terms of seed germination, the 6-Benzylaminopurine (6-BA) treatment with 80 mg · L^{-1} soaked for 24 h had the best effect, with the shortest germination time lag (GTL), the highest germination percentage (GP), and the lowest mean germination time (MGT). In respect of germination, in combination with the growth of seedlings, both 10-50 mg · L^{-1} 6-BA and 500 mg · L^{-1} gibberellic acid (GA_3) treatments were better, and 50 mg · L^{-1} 6-BA was the best treatment for promotion effect, especially. The low concentration of KNO_3 and NH_4NO_3 solution could increase GP, but they did not significantly accelerate germination processes. Indole-3-acetic acid (IAA) and 1-Naphthylacetic acid (NAA) could even inhibit seed germination and seedling growth. The results can provide morphological data for genetic diversity of the rare and endangered plant *G. paucinervis*, and provide scientific information for better protection, development and utilization of valuable *G. paucinervis*.

Key words: endangered plant, seed germination, plant growth regulator, seed dormancy, morphological differentiation, seedling growth

金丝李(*Garcinia paucinervis*)为藤黄科(Guttiferae)藤黄属(*Garcinia*)乔木,是“广西五大硬木之一”(梁瑞龙,2015),主要分布于广西西部、南部和云南东南部海拔 194~830 m、坡度较陡的石灰岩岩溶地貌山地上,为石山特有树种(张俊杰等,2017;申文辉等,2017)。金丝李生境脆弱、分布点有限且分散、种子发芽不易(李西林等,2016)、天然更新困难(陈家庸和黄正福,1988)、乱砍滥伐现象严重等,因此 IUCN 将其列为 EN 级(Farm et al,2003)物种,是《中国珍稀濒危保护植物名录》(国家环境保护局等,1987)中的二级重点保护植物和《中国植物红皮书》(傅立国等,1991)中的易危种,也被录入《广西壮族自治重点保护野生植物名录》中。果实和种子是受遗传控制较强的特征,最具有区分和比较的意义(Ruby,1967)。种子是植物世代繁衍和扩散的主要载体,种子萌发是其物种延续和种群更新的关键,也是植物体生活史中重要而脆弱的阶段,直接影响到植物体后期的生长发育和形态建成,也影响着植物种群动态发展和生物多样性水平(王彦荣等,1996)。喀斯特地区植被的恢复需要大量幼苗的贮备(王明云等,2010)。因此,对石山植物种子生物学研究成为举足轻重的环节。

金丝李是北热带和南亚热带石山地区的乡土树种,适应当地的生态环境,可利用该树种对该地区进行植被恢复和城镇绿化(Montagnini,2001;张旭东等,2005),但所面临的最大难题是资源种苗不够,且国内外对金丝李繁殖研究鲜见报道。本研究发现,金丝李与山竹子(Mad,1990)一样,扦插繁殖极为困难,种子萌发十分缓慢。从野外调查得知,金丝李大树和有结实的植株极少,极少萌蘖,推测有性生殖是其野外繁殖的唯一途径(张俊

杰等，2017）。如何使金丝李种子快速整齐地萌发，成为有效利用金丝李资源的重要问题，而采用外源物质浸种却是提高种子活力、推动幼苗生长的一种简单易行的方法（Little & Savidge，1987）。外源物质的加入，能够促使种子内信号的传导，调节内源激素的含量水平，参与或干预蛋白质酶等酶的生理代谢，从而引起某些特定基因的表达，做好发芽和生长的生理生化准备。

本研究通过观察金丝李果实、种子形态特征，分析其种群间、种群内形态分化和种子萌发、幼苗生长的规律，并研究吲哚乙酸（IAA）、赤霉素（GA_3）、6-苄氨基嘌呤（6-BA）和萘乙酸（NAA）四种植物生长调节剂和 KNO_3、NH_4NO_3两种化学药剂浸种对金丝李种子萌发和幼苗生长的影响，以期找到促进金丝李种子萌发的外源物质及最佳浓度，营建人工种群，为更好地保护、开发和利用金丝李这一珍稀濒危观赏植物提供科学依据。

1　材料与方法

1.1 供试种子

金丝李果实于2016年6月采集自广西靖西市胡润镇、安宁乡和龙州县弄岗国家级自然保护区3个天然种群，并用GPS测定各种群海拔高度和经纬度，取土样带回实验室以测定土壤有机质含量和pH值。各采集地情况见表1。在室外把果实浸泡数天，搓洗掉果皮果肉，清水冲漂洗净种子。

1.2 形态指标及其他衡量指标测定

用电子天平、直尺、游标卡尺等分别测量发育健康成熟的50粒果实和种子的10个形态性状，包括果实长度（FL）、果实宽度（FB）、果皮厚度（PT）、果柄粗（CT）、宿存柱头宽（PSW）、果实重量（FW）、种子长度（SL）、种子宽度（SB）、种子重量（SW）、百粒重（HSW）。计算果实和种子的3个形态指标，包括果实整体形态（FL/FB）、种子整体形态（SL/SB）、种子质量百分比（SW/FW）。其中，果实或种子的长度与果梗延伸方向一致，宽度为与之垂直的方向，种子百粒重测量重复8次（ISTA，1996）。变异系数（*CV*）= 标准偏差/平均值。各指标测定均重复3次。

种子含水量（SMC）：采用烘干法，将10粒种子切成0.5 mm厚的薄片，烘至恒重，SMC（%）=（鲜重−干重）/鲜重×100%。

坏种率（BSR）：从采集的种子中随机抽取50粒，BSR（%）= 病虫害种子数/供试种子数×100%。

种子生活力（SV）：剔除明显病虫害的种子后，随机抽取30粒种子，采用TTC法（张志良和翟伟菁，2002），SV（%）= 有生活力的种子数/供试种子数×100%。

1.3 种子萌发试验

筛选饱满无病虫害的种子在0.1%的 K_2MnO_4 溶液消毒30 min，清水洗净，不同种群萌发试验即刻播种。其余试验均采用NG种群的种子，在各外源物质溶液中浸泡24 h后播种，其中IAA、GA_3、NAA分别设置50、100、300和500 mg · L^{-1} 4个不同浓度梯度，6-BA设置10、30、50和80 mg · L^{-1}浓度处理，KNO_3和 NH_4NO_3则分别配置0.1%、0.2%、0.4%和0.6% 4个浓度，以蒸馏水浸泡作为对照（CK）。萌发试验容器为内径17.2 cm × 11.7 cm × 7 cm，容量1 000 mL的塑料盒，铺以4 cm厚的已消毒河沙作为基质，种子埋入1 cm深处，每盒播10粒，每处理2盒共20粒，3个重复，放入25 ℃、周期性光照（70 μmol · m^{-2} · s^{-1}，12 h · d^{-1}）的LRH-250-G光照培养箱，保持基质湿润。以芽顶出沙层为种子萌发标准，前90 d每天统计1次种子萌发数，之后每7 d统计1次，记录和观察种子萌发及幼苗生长情况，其中当某处理萌发率达90%时，再过3周该处理无种子萌发则试验结束（315 d）。

1.4 萌发参数的计算

评价种子活力的3个参数，包括萌发时滞（Germination time lag，GTL）、萌发率（Germination percentage，GP）和平均萌发时间（Mean germination time，MGT）。GTL（d），即萌发启动时间，指从萌发试验开始到第1粒种子开始萌发所用时间。GP（%）= 萌发种子数/供试种子数×100%。MGT = $\sum(t_i \times n_i)/\sum n_i$，式中 t_i为播种之日开始的第 i 天，n_i为播种后第 i 天萌发的种子数（Liu et al，2005），可以反映种子萌发的快慢程度。

表 1 三个种源地概况

Table 1 General situation of three provenances

种群代码 Population code	采样地点 Sampling site	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔 Altitude (m)	采集点生境 Sampling habitat	土壤 pH Soil pH	有机质含量 Organic content (g·kg^{-1})
HR	靖西市湖润镇 Hurun Town in Jingxi City	23°3′26″ N	106°47′39″ E	520	石山大石堆 Stone piles	7.36	5.10
AN	靖西市安宁乡 Anning Township in Jingxi City	22°54′13″ N	106°16′11″ E	830	边境山间路边 Roadside of mountains along border	7.46	10.78
NG	龙州县弄岗国家级自然保护区 Nonggang National Natural Reserve in Longzhou County	22°27′58″ N	106°57′18″ E	280	保护区内 Within reserve	7.05	10.44

1.5 幼苗生长参数测定

萌发试验结束后,各处理随机抽取早期萌发的 5 株幼苗,剪掉留存的种子,用电子天平、直尺测量并记录其地上和地下部分生物量、主根长,其中生物量为 105 ℃下烘 0.5 h 后,65 ℃中烘干至恒重的重量;用 Win-RHIZO 根系扫描分析系统测量根系总根长、根表面积、总根体积、根尖数,共 7 个参数作为评价幼苗生长的指标。

1.6 数据处理分析

用 Excel 2010 进行数据统计,用 SPSS19.0 的单因素方差分析、Duncan 法进行多重比较,对种群种子性状进行配对样本 t 检验。果实、种子性状以平均值±标准差($\bar{x}\pm s$)表示,其他以平均值±标准误($\bar{x}\pm S_{\bar{x}}$)表示,$P=0.05$,用 SigmaPlot 11.0 绘图。

2 结果与分析

2.1 果实与种子形态特征

金丝李果实为核果,椭圆形或卵状椭圆形,长 3.34~4.37 cm,宽 1.83~2.26 cm,随着果实发育由绿色渐变为黄色至红褐色,宿存萼片和半球形柱头(图 1),单果重 6.71~9.63 g,果肉酸甜可食,内果皮为革质薄膜,内含 1 粒种子。种子为黄褐至红褐色,卵形至宽卵形,长 2.48~3.08 cm,两端之间有一浅凹槽,宽 1.49~1.67 cm,种子百粒重 392.50~438.18 g,膜质种皮,薄而半透明。种皮表面种脐端有带状微凸起条纹,或裂开呈皱纹状,向种孔处延伸(图 2)。胚位于种子中部,从种孔端向种脐端延伸,窄椭圆形,两端尖,与同属植物印度藤黄(*G. indica*)一样(Malik et al,2005),胚芽、胚轴和胚根不易区分,胚乳极丰富,有黄色乳汁(图 3)。

2.2 不同种群果实、种子表型性状与变异

由表 2 可知,13 个指标中,9 个形态性状在 3 个种群间达到显著水平。其中,HR 种群除 PSW 和 SW/FW 外,其余各表型性状值在 3 个种群中最小。AN 种群的果实整体形态与种子的整体形态都最接近 1,而 NG 种群最偏离 1,说明 AN 种群的果实和种子偏圆,NG 种群则偏窄。由表 3 可知,3 个种群种子在形态总体差异上达到显著或极显著水平,表明种群间已产生明显的形态分化。3 个种群种子含水量为 42.33%~51.91%,种子由于被微生物侵害或虫蛀,坏种率为16.67%~43.33%(图 4),以 HR 种群受危害最严重。剔除病虫害后的种子,各种群种子生活力均在 90%以上。

在 3 个种群内形态性状的变异系数值中,果实重量(0.129~0.234)和种子重量(0.150~0.232)最大,说明上述 2 个性状在种群内部的分化较其他性状显著,果实整体形态(0.016~0.025)和种子整体形态(0.017~0.042)变异系数值最小,这 2 个性状在种群内部比其它性状稳定。

2.3 种子的萌发及幼苗生长规律

金丝李种子在萌发过程中,先从种脐端萌发出

表 2　不同种群金丝李果实、种子形态性状和其他性状统计

Table 2　Statistics on morphological and other characters of fruits and seeds of *G. paucinervis* in different populations

指标 Index	安宁种群 AN	变异系数 *CV*	胡润种群 HR	变异系数 *CV*	弄岗种群 NG	变异系数 *CV*
FL（cm）	3.337±0.219c	0.066	3.529±0.348b	0.099	4.369±0.252a	0.058
FB（cm）	2.259±0.151a	0.067	1.832±0.151c	0.082	1.976±0.108b	0.121
FL/FB	1.478±0.037c	0.025	1.925±0.045b	0.023	2.211±0.035a	0.016
PT（cm）	0.234±0.026a	0.111	0.203±0.036b	0.177	0.165±0.015c	0.091
CT（cm）	0.236±0.021b	0.089	0.226±0.018b	0.080	0.281±0.025a	0.089
PSW（cm）	0.322±0.024b	0.075	0.350±0.021a	0.060	0.316±0.024b	0.076
FW（g）	9.633±1.731a	0.180	6.706±1.570c	0.234	8.975±1.154b	0.129
SL（cm）	2.482±0.218c	0.088	2.847±0.295b	0.104	3.080±0.214a	0.069
SB（cm）	1.667±0.115a	0.069	1.486±0.097c	0.065	1.539±0.096b	0.062
SL/SB	1.488±0.035c	0.024	1.912±0.081b	0.042	2.001±0.034a	0.017
SW（g）	4.248±0.934ab	0.220	4.002±0.927b	0.232	4.570±0.687a	0.150
SW/FW	0.440±0.045c	0.102	0.597±0.018a	0.030	0.508±0.018b	0.035
HSW（g）	392.500±26.972b	0.069	406.725±17.559b	0.043	438.175±7.753a	0.018
SMC（%）	51.910±2.350a		42.330±0.069b		45.292±0.723b	
BSR（%）	16.667±5.774b		43.333±8.819a		17.778±3.849b	
SV（%）	94.444±1.924ab		90.000±3.333b		95.556±1.924a	

注：不同小写字母表示处理间差异性显著（$P<0.05$）。下同。

Note：Different lowercases indicate significant differences（$P<0.05$）. The same below.

表 3　种群间果实和种子形态总体差异显著性配对 *t* 检验

Table 3　Paired *t*-test of the significance of the general inter-popuations morphological variations of fruits and seeds

种群 Population	胡润 HR	安宁 AN
安宁 AN	−2.174 *	—
弄岗 NG	5.921 * *	9.315 * *

注：* 表示显著（$P<0.05$）；* * 表示极显著（$P<0.01$）。

Note：* indicates significant differences（$P< 0.05$）；* * indicates extremely significant differences（$P<0.01$）.

胚根，胚根长至 1～2 cm 时，由种孔端萌出胚芽（偶有从种子中部萌芽）。不定根在胚芽长至0.7～1.5 cm 时于其基部长出，生长速度远大于胚根并逐渐形成主根。当胚芽长至 8 cm 左右时，真叶展开，逐渐由紫红色变为绿色，茎上有 3～4 对小叶，无明显子叶（图 5）。种子留存土中，连接胚轴和不定根，一年生苗高 13～20 cm。金丝李与同属植物岭南山竹子（*G. oblongifolia*）和多花山竹子（*G. multiflora*）的种子萌发特性相似，但其种子留存而后两者脱落（张德明，1995；王英强和冯颖竹，1999）。

2.4 不同种群金丝李种子的萌发

不同种群的金丝李种子，由于长期环境适应过程中遗传物质的变异和分化，种子萌发过程存在差异，萌发过程非常缓慢，胡润和弄岗种群中间有约 120 d 无萌发（图 6：A）。在萌发时滞上，胡润（58 d）>安宁（50 d）>弄岗（46 d），3 者未表现出显著差异（图 6：B）。各种群最终萌发率安宁（78.33%）显著高于弄岗（55%）与胡润种群（48.33%）（图 6：C）。

3 个种群间的平均萌发时间差异不显著,胡润种群萌发最缓慢(188.50 d)(图 6:D)。

2.5 不同外源物质对金丝李种子萌发的影响

由图 7 可知,对照和各外源物质处理的金丝李种子萌发动态呈现前后期稍快中间缓慢甚至停滞的趋势。无论何种浓度的 NAA 处理,整个萌发过程中萌发率都比对照低,而 6-BA 则相反。IAA、GA_3、KNO_3和 NH_4NO_3依据浓度不同,或促进或抑制萌发。其中,500 mg·L^{-1}的 GA_3和 10~80 mg·L^{-1}的 6-BA 处理与对照相比,萌发启动时间显著缩短。500 mg·L^{-1}的 GA_3、10~80 mg·L^{-1}的 6-BA、0.1%的 KNO_3和 0.1%的 NH_4NO_3均能显著提高金丝李种子的萌发率。由图 8 可知,只有 80 mg·L^{-1}的 6-BA 处理能显著提高金丝李种子的平均萌发时间。总体而言,500 mg·L^{-1}的 GA_3和 10~80 mg·L^{-1}的 6-BA 可显著促进金丝李种子的萌发。

2.6 不同外源物质对金丝李幼苗生长的影响

从表 4 可以看出,所有外源物质处理对于金丝李幼苗地上部分生物量的促进作用均不明显,甚至产生抑制作用。50 mg·L^{-1}的 6-BA 与对照相比,能显著增加地下部分生物量、总根长和根表面积,表现为根系粗壮发达,而 80 mg·L^{-1}的 6-BA 对幼苗地上和地下部分生物量和主根生长有不显著的抑制作用。0.1%~0.6%的 NH_4NO_3与对照相比,能显著促进须根的增多。300 mg·L^{-1}和 500 mg·L^{-1}的 NAA 与对照相比则能显著抑制地上部分生物量和总根长度,也减少了根表面积和根尖数,而 0.1%~0.6% KNO_3则显著抑制了须根的生长。而其他各处理对金丝李幼苗根系的影响均不显著。从种子萌发结合幼苗生长情况来看,以 50 mg·L^{-1}的6-BA处理最好,其次为 30、10 mg·L^{-1}的 6-BA 和 500 mg·L^{-1}的 GA_3处理。

3 讨论与结论

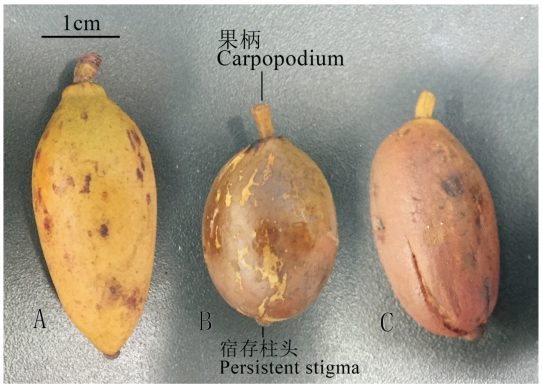
3.1 金丝李种子生态适应与不同种群种子形态分化

金丝李种子大,落地后不易被风吹移或被昆虫搬移,推测其主要靠重力或动物传播。大种子产生的幼苗比小种子产生的抗性要强,在环境胁迫下存活率高(赵新风等,2009)。种子质量愈大,所含的能量愈多(Yanful & Maun,1996),金丝李种子萌发后,留存种子内的营养物质可通过胚轴为幼苗的发育提供营养供给,其果实较尖端和宿存的柱头有利于种子在重力作用下掉落而插入土层中,为萌发创造条件。这些可能是金丝李种子为适应石山土层浅薄环境所演化出的特征。

种子质量对植物种群的未来命运起着举足轻重的作用,天然采集的金丝李种子中遭受病虫害导致无生活力的种子较多,使可获得的种子资源更少。综合 3 个种群的形态和萌发情况,AN 和 NG 种群种子的多数表型性状较 HR 种群大,而 HR 种群的萌发整齐度最差、萌发率最低。HR 种群在调查中仅发现 7 株金丝李,生于大量石堆间,土层稀薄,有机质含量较低,在 3 个种群中生态环境最为严峻,所以果实、种子质量要低于其他种群,与对金花茶(*Camellia nitidissima*)、云南金钱槭(*Dipteronia dyeriana*)的研究结果类似(柴胜丰等,2008;李珊等,2003)。果实、种子的表型性状在不同种群间存在较大差异,说明 3 个种群已产生较明显的形态分化,推测是由于地理阻隔,自然环境因子间的差异,使得金丝李在长期的环境适应过程中以不同繁殖策略来应对,导致各种群遗传物质的变异和分化而在不同种群间产生形态特征的多样性。后续可通过对各种群 DNA 水平的研究分析它们形态分化的遗传机理。

3.2 金丝李种子休眠与外源物质打破休眠

种子休眠是指在一定时间内,具有活力的种子在正常的环境因子(温度、水分、氧气、光照等)的组合下不能萌发的现象(Bewley,1997)。剔除病虫害的金丝李种子后,生活力≥90%,但 90 d 内各种群发芽率均不到 30%,315 d 种子发芽率仅为 48.33%~78.33%,其发芽速率非常慢、出苗不整齐,因此金丝李种子存在休眠(Finchsavage & Leubnermetzger,2006)。种子休眠是植物对周围环境适应的繁殖策略,可减少同胞后代间的竞争,避免其在偶然的恶劣天气下种群覆灭,为延续生命提供保障(张云等,2016;Linkies et al,2010)。金丝李种子播后中间一段时间停滞萌发的特性,使其对可变环境中的生存风险进行分摊,可能是一种



注：**A**. 弄岗种群；**B**. 安宁种群；**C**. 胡润种群。下同。

Note：**A**. Nonggang (NG) population；**B**. Anning (AN) population；**C**. Hurun (HR) population. The same below.

图 1　不同种群金丝李果实

Fig. 1　Fruits of *G. paucinervis* in different populations

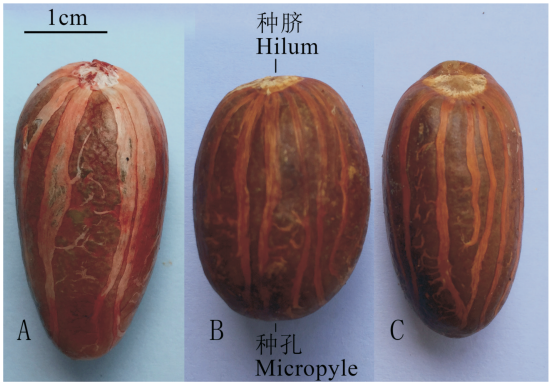


图 2　不同种群金丝李种子

Fig. 2　Seeds of *G. paucinervis* in different populations

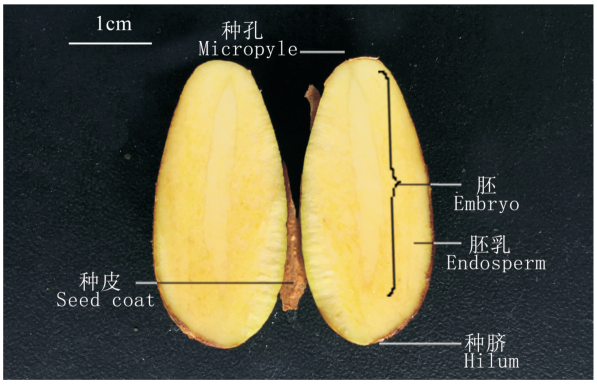


图 3　金丝李种子解剖图

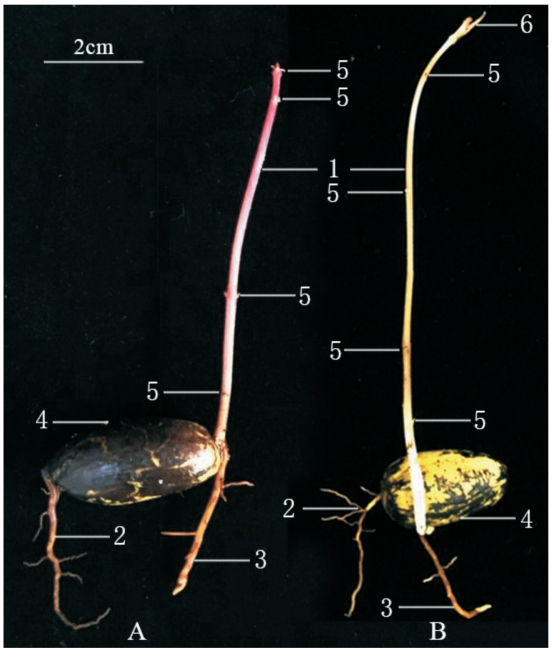
Fig. 3　Anatomical picture of *G. paucinervis* seed

注：**A**. 虫蛀种子；**B**. 微生物侵染的种子。

Note：**A**. Seeds eaten by worms；**B**. Seeds infected by microorganisms.

图 4　被虫蛀或微生物侵染的金丝李种子

Fig. 4　Seeds of *G. paucinervis* eaten by worms or infected by microorganisms



注：**A**. 种孔端萌发；**B**. 种子中部萌发。**1**. 上胚轴；**2**. 胚根；**3**. 不定根；**4**. 种子；**5**. 小叶；**6**. 真叶。

Note：**A**. Germination at micropyle；**B**. Germination in the middle of a seed. **1**. Epicotyl；**2**. Radicle；**3**. Adventitious root；**4**. Seed；**5**. Leaflet；**6**. Leaf.

图 5　金丝李种子萌发图

Fig. 5　Germination picture of *G. paucinervis* seeds

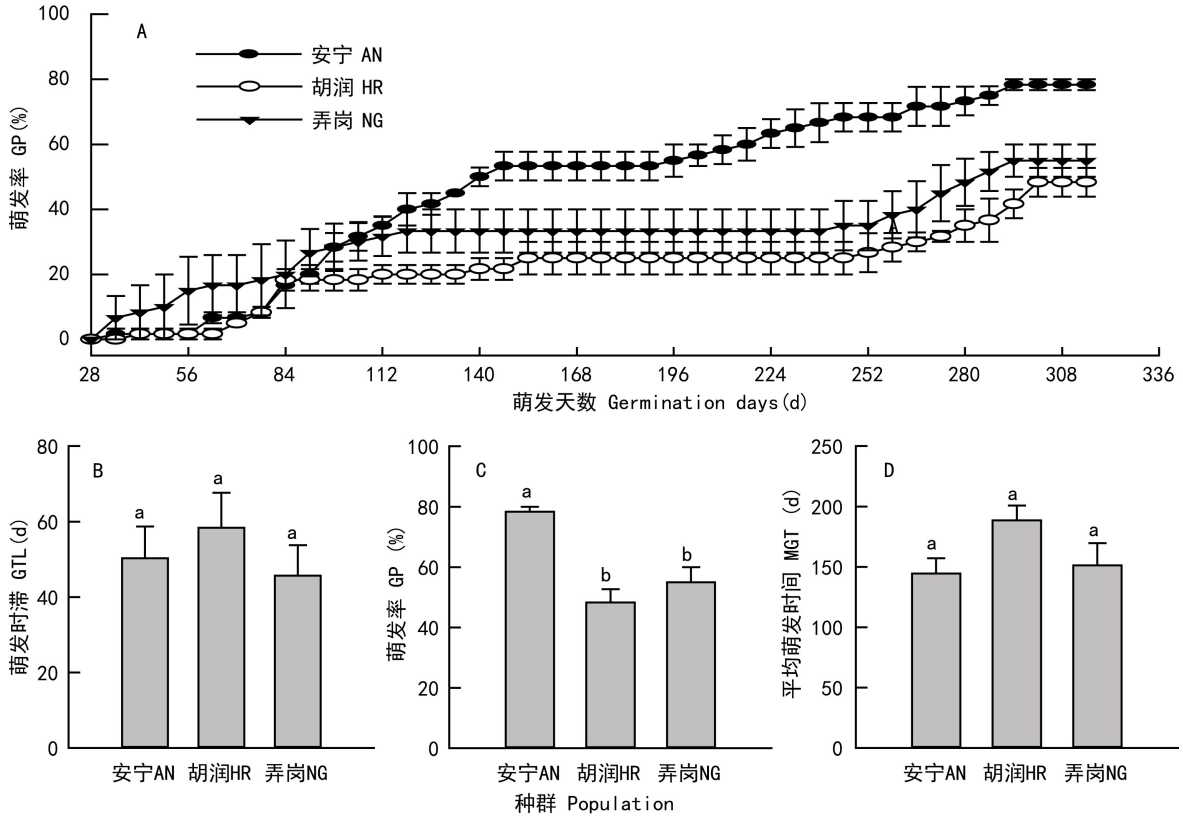


图 6 不同种群金丝李种子萌发动态(**A**)与萌发参数(**B**、**C**、**D**)

Fig. 6 Germination processes (**A**) and germination parameters (**B**, **C**, **D**) of *G. paucinervis* seeds in different populations

为适应环境变化而演化出的能提高其生存率的繁殖策略(孟雅冰和李新蓉,2005),产生的原因还需进一步研究。

生产上需要种子快速、整齐地萌发,休眠特性通常给实际生产中带来不便。适宜的外源物质处理可打破其休眠,对种子萌发有促进作用。GA_3可部分抑制休眠物质的含量,诱导 α-淀粉酶、蛋白酶等水解酶的合成和分泌(Yu et al,2004),加强种子有氧呼吸,促进种子胚轴和胚乳中的新陈代谢。6-BA能诱导芽的分化,促进细胞分裂,消除 ABA 等化学抑制物质的抑制作用而打破休眠(刘用生和李秀菊,1994)。6-BA 能有效促进同属植物山竹子(*Garcinia mangostana*)种子发芽(高艳梅等,2016)。本研究中,单从种子萌发来说,500 mg·L^{-1}的 GA_3、10~80 mg·L^{-1}的 6-BA 均能有效打破种子休眠,促进金丝李种子的萌发,以 80 mg·L^{-1}的 6-BA 效果最好,萌发启始时间最早、萌发率最高、平均萌发时间最短。据 Amen(1968)研究,当外界条件刺激促进休眠种子的内源物质(如 GA、CTK 等)活化,恢复代谢活性,打破内源促进与抑制物之间的平衡时,种子萌发。王家源(2005)的研究表明,用 GA_3浸种可增加生长促进物赤霉素的含量,激活有关酶的活性,使内源促抑物之间趋于促进,加快了青钱柳(*Cyclocarya paliurus*)种子的萌发。因此,金丝李种子可能是缺乏萌发促进物质或酶活性低(李铁华等,1997)而导致的生理休眠,500 mg·L^{-1}的 GA_3、10~80 mg·L^{-1}的 6-BA 处理可活化其内源促进物质。

结合幼苗的生长情况来看,10~50 mg·L^{-1}的 6-BA 和 500 mg·L^{-1}的 GA_3处理效果均较好。50 mg·L^{-1}相比 80 mg·L^{-1}的 6-BA 处理,虽然萌发时滞延后 2 d,发芽率有所降低但不显著,还能显著

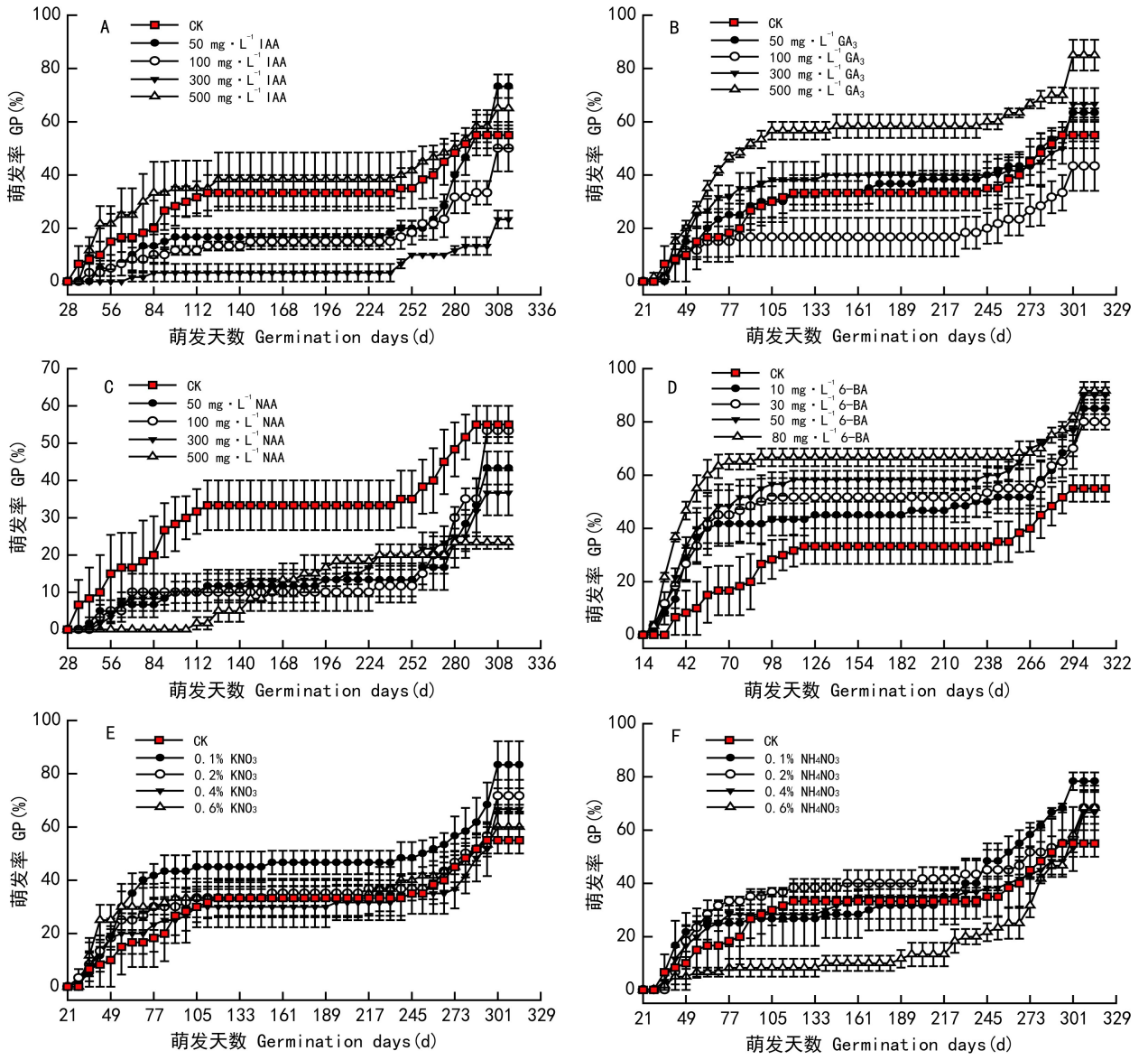


图 7　外源物质处理下金丝李种子萌发动态

Fig. 7　Germination dynamics of *G. paucinervis* seeds in exogenous substances treatments

促进幼苗根部发育，80 mg · L^{-1}处理对幼苗生长效果有轻微地抑制作用。因此，在实践引种和保育中建议使用 50 mg · L^{-1}的 6-BA 浸种。低浓度的 KNO_3和 NH_4NO_3能提高萌发率，但未显著加快萌发进程，IAA 和 NAA 对种子萌发和幼苗生长甚至有抑制作用，且用 NAA 处理种子腐烂率较高，推测可能试验设计浓度超过了促进萌发范围而产生抑制作用(段金玉和谢亚红，1982)。

6-BA 和 GA_3处理虽可加快金丝李种子萌发进程，一定程度打破了种子休眠，但平均萌发时间均大于 100 d，萌发过程仍较缓慢，因此需探索其休眠机理，获得打破休眠的更有效方法。后续可从金丝李种子自身因素(结构、内含物等)研究其休眠类型和机制，从外界条件(温度、水分、光照等)找出限制金丝李种子发芽的环境因子，为其大规模繁殖提供理论支撑，以便更好地进行金丝李生境的恢复和改良，引种推广这一优美观叶树种。

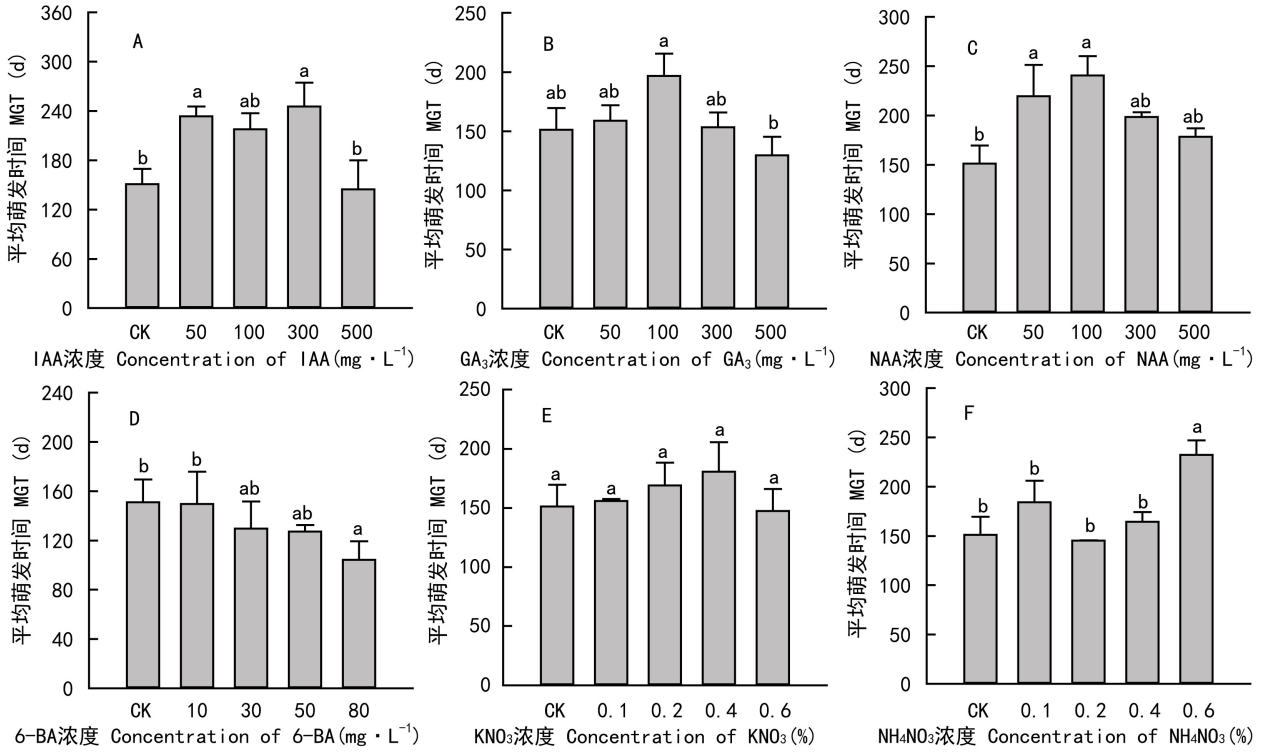


图 8 外源物质处理下金丝李种子平均萌发时间

Fig. 8 Mean germination time (MGT) of *G. paucinervis* seeds in exogenous substances treatments

参考文献:

AMEN RD. 1968. Gibberellic acid stimulate seed germination via amylase synthesis [J]. Plant Physiol, 34: 1-30.

BEWLEY JD, 1997. Seed germination and dormancy [J]. Plant Cell, 9(7): 1055.

BOSCAGLI A, SETTE B, 2001. Seed germination enhancement in *Satureja montana* L. ssp. *montana* [J]. Seed Sci Technol, 29: 347-355.

CHEN JY, HUANG ZF, 1988. A preliminary study on the introduction and preserving of rare and endangered plants [J]. Guihaia, 8(2): 179-189. [陈家庸,黄正福,1988. 珍稀濒危植物引种保存的初步研究 [J]. 广西植物,8(2): 179-189.]

DUAN JY, XIE YH, 1982. Effects of hormones and seed treatment on the germination of seeds of *Cymbidium* species under sterile condition [J]. Acta Bot Yunnan, 4(2): 197-201. [段金玉,谢亚红,1982. 在无菌条件下,激素和种子处理对兰属十种植物种子萌发的影响 [J]. 云南植物研究,4(2):197-201.]

FARM K, GARDEN B, HAU BCH, et al, 2003. Summary of findings from some rapid biodiversity assessments in West Guangxi, China, July 1999 [J]. South Chin For Biodivers Surv Rep Ser (Online Simpl Vers), (36).

FINCHSAVAGE WE, LEUBNERMETZGER G, 2006. Seed dormancy and the controlof germination [J]. New Phytol, 171(3): 501-523.

FU LG, 2012. Higher plants of China (Revised Edition) [M]. Qingdao: Qingdao Publishing House: 685-691. [傅立国, 2012. 中国高等植物(修订版) [M]. 青岛:青岛出版社:685-691.]

GAO YM, CHEN B, FAN YX,et al, 2016. Effects of different saturation and different treatments on seed germination of *Garcinia mangostana* [J]. Chin Trop Agric, 71(4): 47-49. [高艳梅,陈兵,范愈新,等, 2016. 不同饱满度和不同处理对山竹子种子萌发的影响 [J]. 中国热带农业,71(4):47-49.]

ISTA, 1996. International rules for seed testing [J]. Seed Sci Technol, 24: 151-154.

LI S, CAI YL, XU L, et al, 2003. Morphological differentiation of samaras and seeds of *Dipteronia dyeriana* (Aceraceae) [J]. Acta Bot Yunnan, 25(5): 589-595. [李珊,蔡宇良,徐莉,等,2003. 云南金钱槭果实、种子形态分化研究 [J]. 云南植物研究,25(5):589-595.]

LI TH, ZHOU YX, DUAN XP, 1997. A premilinary study of physiological dormancy character of *Bretschneidera sinensis* Hemsl seeds [J]. J Centr S Univ For Technol, 17(2): 41-44. [李铁华,周佑勋,段小平, 1997. 钟萼木种子生理休眠

表 4　不同外源物质对金丝李幼苗生长的影响

Table 4　Effects of different exogenous substances on seedling growth of *G. paucinervis*

外源物质 Exogenous substance	浓度 Concentration	地上部分生物量 Aboveground biomass (g)	地下部分生物量 Underground biomass (g)	主根长 Taproot length (cm)	总根长 Total root length (cm)	根表面积 Surface of root (cm^2)	总根体积 Root volume (cm^3)	根尖数 No. of root tip
IAA	CK	0.426 ± 0.047a	0.103 ± 0.016a	15.820 ± 3.383a	23.538 ± 2.383ab	6.406 ± 1.177ab	0.145 ± 0.041ab	140.800 ± 5.342a
	50 mg · L^{-1}	0.367 ± 0.027a	0.114 ± 0.018a	15.240 ± 2.291a	22.787 ± 1.334a	9.038 ± 1.030a	0.290 ± 0.050a	74.000 ± 5.882b
	100 mg · L^{-1}	0.343 ± 0.041a	0.117 ± 0.035a	12.400 ± 2.352a	26.101 ± 4.016ab	7.326 ± 1.781ab	0.172 ± 0.059ab	109 ± 10.625ab
	300 mg · L^{-1}	0.187 ± 0.058b	0.062 ± 0.018a	7.840 ± 3.296a	17.408 ± 3.079a	4.477 ± 1.309c	0.102 ± 0.045b	74.800 ± 20.841b
	500 mg · L^{-1}	0.440 ± 0.039a	0.128 ± 0.024a	13.260 ± 2.682a	33.124 ± 4.009b	7.980 ± 1.171ab	0.162 ± 0.041ab	113.600 ± 6.055a
GA_3	CK	0.426 ± 0.047ab	0.103 ± 0.016ab	15.820 ± 3.383a	23.538 ± 2.383a	6.406 ± 1.177a	0.145 ± 0.041a	140.800 ± 5.342a
	50 mg · L^{-1}	0.324 ± 0.024b	0.109 ± 0.015ab	12.360 ± 1.443a	22.242 ± 2.950a	6.057 ± 0.691a	0.138 ± 0.025a	131.000 ± 11.537a
	100 mg · L^{-1}	0.314 ± 0.026b	0.076 ± 0.011b	10.140 ± 1.884a	19.960 ± 2.318a	5.103 ± 0.642a	0.106 ± 0.017a	129.600 ± 6.423a
	300 mg · L^{-1}	0.471 ± 0.045a	0.132 ± 0.032b	14.600 ± 3.354a	25.600 ± 4.097a	7.446 ± 1.841a	0.181 ± 0.058a	131.200 ± 5.083a
	500 mg · L^{-1}	0.496 ± 0.076a	0.162 ± 0.034a	14.760 ± 2.611a	28.479 ± 2.942a	8.122 ± 0.969a	0.200 ± 0.052a	152.800 ± 13.429a
NAA	CK	0.426 ± 0.047a	0.103 ± 0.016a	15.820 ± 3.383a	23.538 ± 2.383a	6.406 ± 1.177a	0.145 ± 0.041ab	140.800 ± 5.342a
	50 mg · L^{-1}	0.198 ± 0.032c	0.087 ± 0.016ab	13.160 ± 1.523ab	20.298 ± 0.881ab	6.273 ± 0.782ab	0.167 ± 0.039a	71.400 ± 3.763b
	100 mg · L^{-1}	0.298 ± 0.027b	0.060 ± 0.016ab	8.580 ± 0.995bc	20.322 ± 3.878ab	4.697 ± 0.626abc	0.088 ± 0.007ab	81.400 ± 5.741b
	300 mg · L^{-1}	0.291 ± 0.027bc	0.054 ± 0.008b	7.160 ± 0.739c	14.457 ± 2.097b	3.531 ± 0.516c	0.069 ± 0.010b	66.200 ± 4.954b
	500 mg · L^{-1}	0.275 ± 0.011bc	0.064 ± 0.012ab	8.520 ± 1.015bc	13.710 ± 2.277b	3.886 ± 0.660bc	0.091 ± 0.021ab	66.200 ± 4.294b
6-BA	CK	0.426 ± 0.047ab	0.103 ± 0.016b	15.820 ± 3.383a	23.538 ± 2.383c	6.406 ± 1.177b	0.145 ± 0.041a	140.800 ± 5.342b
	10 mg · L^{-1}	0.505 ± 0.029a	0.181 ± 0.03a	15.600 ± 1.961a	30.187 ± 3.167abc	9.306 ± 1.196ab	0.237 ± 0.042a	107.400 ± 8.244b
	30 mg · L^{-1}	0.458 ± 0.055a	0.170 ± 0.028ab	19.580 ± 2.513a	29.071 ± 2.248bc	10.132 ± 1.645ab	0.292 ± 0.069a	106.200 ± 4.212b
	50 mg · L^{-1}	0.494 ± 0.047a	0.216 ± 0.026a	18.960 ± 1.35a	38.538 ± 4.045a	11.242 ± 1.083a	0.264 ± 0.032a	150.400 ± 10.971b
	80 mg · L^{-1}	0.314 ± 0.03b	0.095 ± 0.021b	12.820 ± 1.566a	34.412 ± 2.061ab	8.808 ± 1.010ab	0.191 ± 0.048a	231.400 ± 32.826a
KNO_3	CK	0.426 ± 0.047a	0.103 ± 0.016a	15.820 ± 3.383ab	23.538 ± 2.383ab	6.406 ± 1.177a	0.145 ± 0.041a	140.800 ± 5.342a
	0.1%	0.357 ± 0.027ab	0.094 ± 0.01a	11.700 ± 1.535ab	21.283 ± 1.910ab	5.671 ± 0.554a	0.121 ± 0.014a	108.200 ± 5.562b
	0.2%	0.271 ± 0.028b	0.085 ± 0.014a	9.640 ± 1.058b	18.218 ± 2.306b	5.497 ± 0.870a	0.140 ± 0.038a	94.600 ± 7.004b
	0.4%	0.353 ± 0.035ab	0.142 ± 0.031a	16.180 ± 1.973ab	23.212 ± 1.196ab	8.48 ± 1.355a	0.267 ± 0.081a	95.600 ± 4.739b
	0.6%	0.334 ± 0.021ab	0.123 ± 0.012a	16.800 ± 2.3a	25.877 ± 2.256a	7.87 ± 1.242a	0.200 ± 0.053a	101.200 ± 4.521b
NH_4NO_3	CK	0.426 ± 0.047a	0.103 ± 0.016a	15.820 ± 3.383a	23.538 ± 2.383a	6.406 ± 1.177a	0.145 ± 0.041a	140.800 ± 5.342c
	0.1%	0.442 ± 0.038a	0.122 ± 0.009a	12.060 ± 0.649ab	24.740 ± 1.904a	6.774 ± 0.360a	0.149 ± 0.008a	163.400 ± 7.960b
	0.2%	0.361 ± 0.044ab	0.082 ± 0.015a	10.060 ± 1.556ab	19.178 ± 2.301a	4.999 ± 0.733a	0.105 ± 0.019a	163.400 ± 2.731b
	0.4%	0.372 ± 0.023ab	0.117 ± 0.018a	11.120 ± 2.073ab	23.371 ± 2.314a	6.045 ± 0.861a	0.132 ± 0.031a	169.400 ± 5.591b
	0.6%	0.294 ± 0.039b	0.077 ± 0.027a	6.480 ± 1.5b	21.886 ± 2.418a	4.586 ± 1.068a	0.083 ± 0.033a	202.400 ± 8.388a

特性的初步研究［J］. 中南林学院学报,17(2):41-44.］

LI XL, ZHANG HM, TAN HS, et al, 2016. Distribution, classification and sustainable utilization of *Garcinia* species in China［J］. World Chin Med, 11(7): 1176-1179.［李西林, 张红梅, 谭红胜, 等, 2016. 中国藤黄属植物的资源分布、分类与可持续利用［J］. 世界中医药, 11(7): 1176-1179.］

LIANG RL, 2015. *Garcinia paucinervis*: Guangxi ironwood［J］. For Guangxi, 32(3): 24-25.［梁瑞龙, 2015. 金丝李: 广西铁木［J］. 广西林业, 32(3):24-25.］

LINKIES A, KAI G, KNIGHT C, et al, 2010. The evolution of seeds［J］. New Phytol, 186(4): 817-831.

LITTLE CHA, SAVIDGE RA, 1987. The role of plant growth regulators in forest tree cambial growth［J］. Plant Growth Regul, 6(1-2): 137-169.

LIU YS, LI XJ, 1994. Application of 6-BA in horticultural production practice［J］. Plant Physiol Comm, 30(1): 48-51.［刘用生, 李秀菊, 1994. 6-BA 在园艺生产实践中的应

用[J]. 植物生理学通讯, 30(1):48-51.]

LIU Y, QIU YP, ZHANG L, et al, 2005. Dormancy breeking and storage behavior of *Garcinia cava* Roxb. (Guttiferae) seed: implications for ecological function and germplasm conservation [J]. J Integ Plaut Biol, 47(1):38-49.

LLORET F, CASANOVAS C, PENUELAS J, 1999. Seedling survival of *Mediterranean* shrubland species in relation to root: shoot ratio, seed size and water and nitrogen use [J]. Funct Ecol, 13(2):210-216.

MAD HB, 1990. Vegetative propagation studies inmangosteen (*Garcinia mangostana*) [J]. Jpn J Trop Agric, 34(2): 78-83.

MALIK SK, CHAUDHURY R, ABRAHAM Z, 2005. Seed morphology and germination characteristics in three Garcinia species [J]. Seed Sci Technol, 2005, 33(3):595-604.

MENG YB, LI XR, 2015. Morphology and intermittent germination characteristics of synaptospermy of *Tribulus terrester* [J]. Chin J Plant Ecol, 39(5):508-516. [孟雅冰, 李新蓉, 2015. 蒺藜集合繁殖体形态及间歇性萌发特性[J]. 植物生态学报, 39(5): 508-516.]

MONTAGNINI F, 2001. Strategies for the recovery of degraded ecosystems: experiences from Latin America [J]. Interciencia, 26(10): 498-503.

MORRISON DF, 1971. Expectations and variances of maximum likelihood estimates of the multivariate normal distribution parameters with missing data [J]. J Am Stat Assoc, 66(335): 602-604.

RUBY JL, 1967. The correspondence between genetic, morphological and climatic variation patterns in Scotch pine [J]. Silv Genet, 1967, 16(2): 50-56.

SHENG WH, OU ZY, PANG SL, et al, 2017. Relationships between the spatial distributions of dominant arbor species and environmental factors of *Excentrodendron hsienmu* community in southwest Guangxi, China [J]. Guihaia, 37(6): 694-701. [申文辉, 欧芷阳, 庞世龙, 等, 2017. 桂西南蚬木群落优势树种分布与环境因子的关系[J]. 广西植物, 37(6):694-701.]

State Bureau of Environmental Protection, Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, 1987. List of rare and endangered plants in China [M]. Beijing: Science Press, 1: 25. [国家环境保护局, 中国科学院植物研究所, 1987. 中国珍稀濒危保护植物名录[M]. 北京: 科学出版社, 1: 25.]

WANG JY, 2005. Studies on methods of breaking dormancy and germination physiology of *Cyclocarya paliurus* (Batal.) *Iljinskaja* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University: 45-47. [王家源, 2005. 青钱柳种子解除休眠及萌发生理的研究[D]. 南京:南京林业大学:45-47.]

WANG MY, CHEN B, RONG L, 2010. Indicative research on restoration of the forest vegetation in rocky desertification-affected Karst Areas, Puding County, Guizhou Province [J]. Earth Environ, 38(2): 202-206. [王明云, 陈波, 容丽, 2010. 普定喀斯特石漠化地区森林植被恢复示范研究[J]. 地球与环境, 38(2):202-206.]

WANG YQ, FENG YZ, 1999. A study on seed germination and seedlng growth of *Garcinia mutiflora* [J]. J Zhongkai Agrotechnical Coll, 12(2): 19-25. [王英强, 冯颖竹, 1999. 多花山竹子种子萌发及其幼苗生长分析[J]. 仲恺农业技术学院学报, 12(2):19-25.]

WANG YR, ZHANG JM, NIE B, 1996. Eco-adaptability of seed germination in lawn grass of *Zoysia japonica* cv. Lanyin Ⅲ [J]. Acta Pratacul Sin, 5(2): 49-55. [王彦荣, 张巨明, 聂斌, 1996. 兰引Ⅲ号草坪型结缕草发芽生态适应性的研究[J]. 草业学报, 5(2):49-55.]

YANFUL M, MAUN MA, 1996. Effects of burial of seeds and seedlings from different seed sizes on the emergence and growth of *Strophostyles helvola* [J]. Can J Bot, 74(8): 1322-1330.

YU X, WANG Y, ZHANG J, et al, 2004. Studies on dormancy characteristics of *Cleistogenes songorica* and *Plantago lessingii* seed and some methods for breaking it [J]. Acta Pratacul Sci, 13(6):45-49.

ZHANG DM, 1995. *Garcinia oblongifolia*: Up-and-coming youngster in garden and seed breeding [J]. Plant J, (1): 16. [张德明, 1995. 园林新秀岭南山竹子及其种子繁殖[J]. 植物杂志, (1):16.]

ZHANG JJ, CHAI SF, LÜ SH,et al, 2017. The habitat characteristics and analysis on endangering factors of rare and endangered plant *Garcinia paucinervis* [J]. Ecol Environ Sci, 26(4): 582-589. [张俊杰, 柴胜丰, 吕仕洪, 等, 2017. 珍稀濒危植物金丝李的生境特征及致濒原因分析[J]. 生态环境学报, 26(4):582-589.]

ZHANG XD, DONG LS, ZHOU JX, et al, 2005. Nutrient diagnosis of *Fokienia hodginsii* seedlings using DRIS [J]. Acta Ecol Sin, 25(5): 1165-1170. [张旭东, 董林水, 周金星, 等, 2005. 珍稀乡土树种福建柏苗期 DRIS 营养诊断[J]. 生态学报, 25(5):1165-1170.]

ZHANG Y, MA YM, QIN JY, et al, 2016. The study on seed dormancy and germination characteristics of *Iris scariosa* [J]. Acta Agr Sin, 24(5): 1062-1067. [张云, 马玉梅, 秦景逸, 等, 2016. 膜苞鸢尾种子休眠及萌发特性研究[J]. 草地学报, 24(5): 1062-1067.]

ZHANG ZL, ZHAI WJ, 2002. Plant physiology experiment instruction [M]. Beijing: Higher Education Press: 206. [张志良, 翟伟菁, 2002. 植物生理实验指导[M]. 北京:高等教育出版社:206]

ZHAO XF, ZHU YF, XU HL, et al, 2009. Morphological characters and survival strategy of diaspores of the main desert plants in the lower reaches of Tarim River, Xinjiang, China [J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 29(2):283-290. [赵新风, 朱艳芬, 徐海量, 等, 2009. 塔里木河下游 21 种荒漠植物繁殖体形态特征及对环境的适应[J]. 西北植物学报, 29(2):283-290.]