

# 文冠果的生殖生物学与良种繁育研究进展

戚建华<sup>1</sup>, 姚增玉<sup>2\*</sup>

(1. 西南林业大学 林学院, 云南 昆明 650224; 2. 西南林业大学 西南山地森林资源保育与利用省部共建教育部重点实验室, 云南 昆明 650224)

**摘 要:** 鉴于对能源短缺和气候变化, 生物柴油倍受世界各国政府重视。文冠果(*Xanthoceras sorbifolia* Bunge)是我国特有的油料树种, 是我国政府支持重点发展的生物柴油原料植物。然而文冠果坐果率很低, 生产良种化程度低, 导致产量低、开发成本高、经济效益低, 是当前我国文冠果生物质能源产业发展的瓶颈问题。针对文冠果的生殖生物学和良种繁育方面的研究进展进行了综述, 并提出了存在的问题和需要进一步研发的建议。

**关键词:** 文冠果; 生殖生物学; 繁殖; 育种; 生物柴油

**中图分类号:** S722.5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-7461(2012)03-0091-06

## Review on Reproductive Biology, Propagation and Breeding of *Xanthoceras sorbifolia*

QI Jian-hua<sup>1</sup>, YAO Zeng-yu<sup>2\*</sup>

(1. College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China; 2. Key Laboratory for Forest Resource Conservation and Utilization in the Southwest Mountains of China, Ministry of Education, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China)

**Abstract:** With a deep concern over the energy shortage and climate change, biodiesel has become more attractive to governments globally. *Xanthoceras sorbifolia* an endemic oilseed tree to China, has been identified as a major woody energy plant for biodiesel and given special support to its development by the Chinese Government. However, the low fruit-setting rate and the small percentage of fine breed of this species resulted in a low yield, a high development cost, and a low economic efficiency for the biodiesel production. This is the bottleneck issue in the development of the bio-energy industry of *X. sorbifolia* in China. Problems were raised and needs for further research and development were recommended.

**Key words:** *Xanthoceras sorbifolia*; reproductive biology; propagation; breeding; biodiesel

文冠果(*Xanthoceras sorbifolia*)为无患子科(Sapindaceae)文冠果属(*Xanthoceras*)落叶灌木或小乔木, 是我国特产的油料树种和园林绿化树种, 曾先后为世界各国所引种, 被视为珍贵花木。该树种适应性强, 能耐干旱、严寒、瘠薄和轻度盐碱, 在多石的山地、黄土丘陵、沟壑、撩荒地以及沙荒地等处均能生长发育, 在辽宁建平—北京—山东青岛—安徽合肥—河南栾川—陕西洛南—甘肃平凉—青海循化—西藏察隅一线以西以北的我国北方大部分地区均有分布<sup>[1]</sup>。文冠果栽培在历史上经历了2次潮

起。在20世纪六七十年代为保证粮油安全解决人民的食用油问题, 我国政府提出要向林业要油, 向荒山要油, 走食用油料木本化的道路, 掀起了第1次发展文冠果的热潮。改革开放以后, 随温饱问题的基本解决和人民生活水平的提高, 文冠果作为食用油料的用途逐渐消失, 发展一度停滞, 甚至资源受到一定程度的破坏。近年来, 在石油价格的上涨、能源危机凸显和全球气候变暖的背景下, 各国纷纷制定可再生的清洁能源发展规划, 文冠果被我国政府确定为重点发展的生物能源树种, 再次掀起了大面积

收稿日期: 2011-08-22    修回日期: 2011-09-27

基金项目: 教育部重点实验室科研基金项目(KLESWFU-1102)。

作者简介: 戚建华, 女, 讲师, 博士, 主要从事植物资源利用研究工作。

\* 通讯作者: 姚增玉, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事植物资源利用研究工作。E-mail: zengyuyao@126.com。

造林的热潮。此次文冠果大面积栽培的目的是用其油脂生产生物柴油,但文冠果素有“千花一果”之说,目前产量极低,用其种子作为生物柴油的原料成本太高,成为文冠果作为生物质能源树种的发展瓶颈<sup>[2]</sup>。文冠果种皮经过简单地粉碎后可以作为生物吸附剂用于印染废水处理<sup>[3]</sup>;种皮和果壳还可以作为制备活性炭的原料<sup>[4-5]</sup>;种仁蛋白具有较高的营养价值,脱毒后可供食用或饲用<sup>[6]</sup>;茎干、叶片、果实中含有甾体类、萜类、香豆素类、黄酮类、有机酸类、萜醌类等多种生物活性物质,可供药用<sup>[7]</sup>。除了通过综合利用提高资源利用效率、以文冠果生产和生物柴油加工过程中产生的副产品的高值化利用来反哺生物柴油间接降低其生产成本外,通过提高单位面积产量则可直接降低生物柴油原料成本。然而,坐果率低、生产中良种化程度低是目前文冠果高产栽培中亟需解决的两个重要问题,因此对国内外学者在文冠果的生殖生物学和良种繁育方面的研究进行了归纳和总结,以期为进一步研究提供参考。

1 文冠果的生殖生物学

1.1 花型与花性

文冠果为杂性花,其花型可分为两性花、雄花及无性花 3 种。两性花由花梗、花托、花萼、花瓣、雌蕊、雄蕊等组成,但它的花粉发生败育,一般不开裂,不能起授粉授精作用,因此从功能上讲相当于雌花;雄花的雌蕊退化萎缩于花托之上,看不到子房,其他基本同两性花,雄花能产生大量花粉,起授粉作用;无性花只有花被,雌蕊和雄蕊全部退化,呈绒条状花瓣,因其花瓣重叠,有人称之为重瓣花,它既不能结实,也不能起授粉作用<sup>[8]</sup>。文冠果为总状花序,花序长 10~20 cm,最长 30 cm,每序有花朵 10~40 个。有 3 种花序类型:花序上全部为雄花、全部为两性花和既有雄花又有两性花,这 3 类花序分别占植株个体总花序的 99.5%、0.05%和 0.45%。若同一花序中既有两性花又有雄花,则两性花通常比雄花多,位于花序中间,而雄花位于花序的基部和顶端。文冠果的花芽既有纯花芽又有混合花芽。顶花芽一般为混合芽,侧生花芽多为纯花芽。两性花多位于顶生花序中,而侧生花序中绝大多数为雄花<sup>[9]</sup>。

1.2 花的发育

文冠果花芽分化始于开花前一年的夏秋季,在呼和浩特地区,7 月中、下旬为花芽原基分化至花序原基形成时期,8—9 月为花萼分化形成时期,10—11 月为花瓣分化形成时期,10 月初至翌年 4 月中旬为雌蕊分化形成时期,雌蕊从树木休眠前开始分化

形成,但主要完成于翌年 4 月至 5 月上旬<sup>[10]</sup>。同一株树上,顶生花序比侧生花序生长快,生长量大,停止生长也晚。一般情况下,顶生花序底部的花先开放,侧生花序基本同时开放。顶生花序两性花和侧生花序雄花的花期基本一致,能够充分保证两性花的授粉时间。顶生花序基部到顶部花蕾开放时间可持续 7~10 d,1 朵花可开放 5~7 d,1 棵树的花期可达 10~15 d,同一年份不同植株间花期也不一致,一般相差 9 d 左右,可归因于植株间养分积累水平、花芽分化完成的早晚和激素积累水平的不同<sup>[9-11]</sup>。在整个花的发育过程中,花瓣中心颜色由绿黄色逐渐变姜红,然后变成紫红色<sup>[11]</sup>。

文冠果雄花在发育早期具有两性花的完全结构,并且雌蕊内也产生胚珠,但在发育中后期才出现性别分化,雌蕊退化形成雄花。个别花在形态结构上为雄花和两性花的中间类型,雄蕊能够开裂散粉,雌蕊的大小介于雄花和两性花的雌蕊之间,但不能受精发育,因此在功能上仍为雄花<sup>[9]</sup>。Q. HU<sup>[12]</sup>等研究表明,雄花雌蕊在珠心未形成大孢子母细胞时就开始败育。通过蛋白质双向电泳分析,找到了与雌蕊败育相关的特异蛋白。蛋白质 A1 (14.2 kD)仅存在于开放雄花的败育雌蕊中,而蛋白质 B1 (13.7 kD)和 B2 (18.2 kD)此时则消失,推测 A1 可能与雌蕊的败育相关而 B1 和 B2 可能与雌蕊的正常发育相关。范春霞<sup>[13]</sup>克隆得到 1 个管家基因片段  $\beta$ -actin (200 bp),可能参与了雄花中雌蕊选择性败育。张小方<sup>[14]</sup>研究表明,雄花雌蕊败育前夕和败育的胚珠细胞中均出现核仁分解、染色质凝集并边缘化现象,属于典型的细胞程序性死亡。在败育发生过程中,雌蕊的胎座、心皮隔膜及子房壁的薄壁细胞出现不同程度的液泡化,结构破坏,退化组织无淀粉粒出现且蛋白含量逐渐下降,液泡和线粒体等细胞器以及各种膜结构也发生破坏,珠心细胞壁异常加厚,胞间连丝不明显。

文冠果雄花花丝的伸长和花药的开裂在时间上具有先后性。雄花花丝在花蕾开放前均为短花丝,伴随着花蕾开放,其中 3 个雄蕊花丝伸长,开放后 2~10 h 首先开裂散粉,2~3 d 后其余的短花丝亦陆续伸长并相继开裂散粉,此时所有雄蕊的高度相近。组织学研究表明,两类雄蕊所产花粉粒淀粉和糊粉粒亦无大的区别。两性花雄蕊的花丝从花蕾、初放、盛开直至衰败始终很短,形态上没有发生明显变化且大多数花药不开裂。说明在蕾期向开花初期过渡的阶段,两种花性的花药发育已经开始有所不同<sup>[9,15]</sup>。双向凝胶电泳分析表明,两性花花药比雄

花花药少一个分子量约为 8.6 kD(pI 8.0)的多肽,可能为开裂基因顺式调控元件的表达产物,起激活开裂基因表达的作用;而多出 2 个分子量分别为 70.8 kD(pI 5.0)和 28.2 kD(pI 8.0)的多肽,可能为与雄蕊花药开裂基因表达有关的反式作用因子,起抑制开裂基因表达的作用<sup>[15]</sup>。两性花花粉败育发生在双核期。败育花药不开裂的原因一是缺少正常的唇细胞,二是花药成熟时,绒毡层延续解体,花粉囊内呈粘稠状,不能正常干燥,致使花粉发育失去营养物质的来源,导致花粉的败育。败育花粉缺少萌发孔,花粉内壁很厚,影响花粉的物质吸收和正常萌发。败育花粉生理代谢极弱,细胞器少,淀粉粒少且小,营养物质的亏缺无法维持花粉的正常新陈代谢,致使在发育中夭折<sup>[16]</sup>。

### 1.3 传粉和受精

文冠果为虫媒花,风媒的传粉作用可以忽略,访花昆虫为蜂类、食蚜蝇类、瓢虫和蝇类<sup>[9,17]</sup>。文冠果柱头为湿柱头类型,两性花开放当天能够分泌大量粘液,柱头可授性最强,第 2 天和第 3 天也能分泌粘液,但其量显著减少,开花第 4 天及以后授粉一般不能受精。雄花花粉活力在花蕾期和花开放初期最高,之后逐渐下降。无论是雄花花粉还是两性花开裂花粉在培养基上都能萌发,但前者的萌发率高于后者,在同株和异株两性花柱头上也均能萌发,且萌发需要的时间没有明显差异,但在同株上的萌发率低于在异株上的萌发率。受精后 5~10 d,自花授粉和异花授粉的子房有相似程度的膨大发育,但开花第 1 天的两性花进行自交授粉后 6 d,可在胚珠的雌配子体内观察到大量游离核胚乳存在,只在极少数胚珠内发现 2 细胞原胚,但这些原胚以后不再发育,产生几天后退化消失,成熟果均来自杂交授粉,自交授粉的不能结实<sup>[9,18]</sup>。文冠果繁育系统属于异交、部分自交亲和且需要传粉者的兼性异交系统<sup>[17]</sup>。

### 1.4 果实的发育

未授粉的胚珠不发育;异花授粉 1 周后,同一花序上所有子房同时膨大,且大小相对均一,所有果柄和整个花序轴整体增粗,2 周时结实率几乎达到 100%,但随后有些果实开始败育;授粉 1 周后,自花授粉与异花授粉的子房和胚珠的发育状况基本一致,但随后胚珠和子房停止发育,此后逐渐萎缩,2 周后基本全部脱落;同一花序上自然授粉后子房的发育程度在不同花有较大差异,有的子房膨大,颜色为绿色,果柄加粗,花序轴在授粉受精成功两性花的部位增粗,有的子房、果柄萎缩,很小时即萎蔫。

文冠果物候期因生育地区、生态条件不同而有

较大差异,花期一般 4—5 月,果期 7—8 月<sup>[19]</sup>,从开花传粉到果实成熟大约需要 55~65 d<sup>[9]</sup>。果实为蒴果、绿色,成熟后逐渐变为黄绿色,表面粗糙。丁明秀和敖妍<sup>[20]</sup>观察到花序中部的两性花易于座果,而周庆源和傅德志<sup>[9]</sup>则发现成熟果大多位于果序的近顶端,少数位于果序基部,很少位于果序的中间位置。

### 1.5 落花落果机理

文冠果雄花占 90%以上,有些树上基本全为雄花,整株不结实,这些雄花最终凋谢脱落<sup>[18]</sup>;在自然传粉情况下,90%的两性花能够受精,但其中只有 2%的果实最终发育成熟<sup>[9]</sup>。因此,文冠果表现出严重的落花、落果现象,素有“千花一果”之称,是造成其低产的一个主要原因,也是当前亟待研究的问题。

文冠果的落花落果与树体营养供应有着密切的关系。花芽性别决定期正是花体生长迅速的时期,消耗大量养分,而此时树叶尚未展开,养分不足使得部分花的雌蕊停止发育而形成雄花<sup>[15]</sup>;而在果实发育期,由于抽枝、发叶、枝条增粗等营养生长对养料的争夺,使其无法满足全部幼果生长发育的需要,致使部分幼果脱落<sup>[21]</sup>。研究证明,开花前去掉侧生花序上的大部分雄花和两性花,可以节约树体营养、提高文冠果的坐果率<sup>[22]</sup>。

人工控制授粉试验表明:成熟果均来自杂交授粉,自交授粉的不能结实,且自花花粉对雌蕊接受其它花粉有抑制作用,人工辅助授粉对提高文冠果结实率具有显著作用<sup>[18]</sup>。在花后 2 周,子房已经膨大,此时两性花的脱落可能与授粉受精不良有关。

文冠果“千花一果”现象可能是其长期进化的结果。文冠果根蘖能力强,长期根蘖性营养繁殖使得其对有性繁殖的依赖性下降,选择压力降低,导致有性繁殖退化,且文冠果为文冠果属唯一物种,缺少与同属不同种间的渐渗杂交和基因交流,使其遗传基础相对较窄,不利于其进化。

此外,低温霜冻、大风、大雨等恶劣气候条件和虫害,也会引起落花落果<sup>[20]</sup>。

## 2 文冠果的良种繁育

### 2.1 良种选育

遗传变异是良种繁育的基础。文冠果处于半野生状态,异花授粉自然杂交,在树形、叶形、花型、果形、果实心皮数、果皮厚度、单株结实量、种皮厚度、种仁含油率等方面存在着广泛的遗传变异<sup>[23-24]</sup>。文冠果人工栽培历史短,其选育历史更短,从 20 世纪 70 年代才陆续开展这方面工作,期间因其用途的缺

失而发展一度停滞,近年来又因其在生物质能源方面的应用前景而再度兴起。目前研究工作还主要停留在优良单株和类型选择阶段,杂交育种、诱变育种、基因工程育种等方面鲜有报道<sup>[25]</sup>。多以表型选择为主,近年来也有分子标记辅助选择的报道<sup>[26]</sup>。

2.2 繁殖技术

文冠果可以通过播种育苗、插条育苗、插根育苗、嫁接育苗、根蘖育苗等传统方法进行繁殖。然而种子繁殖由于基因的分离重组导致子代分化,不易保持母本的优良性状,而传统的无性繁殖方法虽能保持亲本的优良性状,但繁殖系数低,难以满足当前生产中对优良种质资源的需求。组织培养快速繁殖不仅繁殖系数高而且能够保持繁殖材料的优良性状,此外组织培养技术还是工程育种等现代育种方法的基础,近年来国内学者正在积极开展此方面的研究工作。目前已通过 3 种途径得到了文冠果组培植株。一是由茎段直接诱导不定芽形成丛生芽然后诱导生根形成植株;二是以茎段和叶片为外植体,诱导形成愈伤组织,进而诱导分化出不定芽和不定根再生出完整植株;三是以合子胚为外植体诱导体胚发生,进而萌发形成再生植株。

柳金凤<sup>[27]</sup>等研究表明,MS + 6-BA 0.3 mg · L<sup>-1</sup> + IAA 0.8 mg · L<sup>-1</sup>最适于不定芽诱导,MS + KT 2.0 mg · L<sup>-1</sup> + IBA 0.5 mg · L<sup>-1</sup> + GA<sub>3</sub> 1.0 mg · L<sup>-1</sup>最适于茎段不定芽的分化培养,MS + 6-BA 1.0 mg · L<sup>-1</sup> + NAA 0.5 mg · L<sup>-1</sup>最适合叶片愈伤组织诱导与分化培养。IBA 和 NAA 对文冠果的生根有促进作用,而 TDZ 在文冠果生根培养中无作用<sup>[27-28]</sup>,高盐浓度的 MS 培养基对生根有一定的抑制作用,低盐浓度的 WPM 和 1/2 MS 培养基适合文冠果组培苗生根,在空气相对湿度保持 80% 以上时,疏松透气性良好的珍珠岩是文冠果生根苗移栽的最佳基质<sup>[29]</sup>。

文冠果的体细胞胚培养一般以成熟或未成熟的合子胚作为外植体,需要经过胚性愈伤组织诱导、体胚诱导和体胚萌发植株再生 3 个阶段<sup>[30-32]</sup>。胚性愈伤组织诱导选用 MS 基本培养基,附加 6-BA 1.0 mg · L<sup>-1</sup>、2,4-D 1.0~2.0 mg · L<sup>-1</sup> 和 NAA 0~1.0mg · L<sup>-1</sup>,蔗糖浓度 2%~3%,固体暗培养。诱导胚性愈伤组织分化出体胚一般采用暗培养或弱光培养,蔗糖浓度 2%,悬浮培养和固体培养均可。悬浮培养选用 B<sub>5</sub> 基本培养基,附加 6-BA 0.5 mg · L<sup>-1</sup>、NAA 0.5 mg · L<sup>-1</sup> 和 NAA 0~0.5 mg · L<sup>-1</sup>。固体培养选用 MS 基本培养基,附加 6-BA 2.0 mg · L<sup>-1</sup>、NAA 0.05 mg · L<sup>-1</sup>。体胚萌发培养基与体

胚诱导培养基基本相同,但不含 2,4-D。刘磊<sup>[33]</sup>等建立了文冠果悬浮细胞培养体系,确定悬浮培养的初始愈伤组织接种量以 5.0 g · 100 mL<sup>-1</sup> 液体培养基为宜,激素浓度以 2,4-D,6-BA,NAA 均为 0.5 mg · L<sup>-1</sup> 为宜,细胞活力在接种第 3 天时达到最大,细胞分裂指数在接种第 10 天时达到最大,鲜质量增长量在第 14 天时达到最大。

顾玉红<sup>[30]</sup>等研究表明,文冠果体细胞胚源于胚性愈伤组织的外层细胞,此区域细胞富含淀粉粒。非胚性愈伤组织的蛋白质组分最少,随着体胚形态的建成,蛋白质组分逐渐增多,再生植株时期的蛋白质组分减少,并得到了各发育时期的标记蛋白质:胚性愈伤组织为 23.0 kD (pI 6.9),鱼雷胚为 27.1 kD (pI 7.5),子叶胚为 25.1 kD (pI 6.6) 和 26.2 kD (pI 6.6),再生植株为 23.2 kD (pI 9.5)<sup>[34]</sup>。钙作为植物体内的第二信使,参与了细胞分化、分裂和形态发生以及植物抗逆反应等过程。Ca<sup>2+</sup> 与文冠果体细胞胚发生过程中细胞的发育时期密切相关:非胚性细胞 Ca<sup>2+</sup> 的含量最少,集中分布在细胞壁和细胞间隙中;胚性愈伤组织的细胞 Ca<sup>2+</sup> 的含量明显增加,集中分布在液泡膜、质膜和细胞质中;球形胚时,质膜上 Ca<sup>2+</sup> 积累的颗粒较大,但其量相对较少;鱼雷胚期 Ca<sup>2+</sup> 的含量明显增多,集中分布在胚芽端和胚根端,胚根最外层细胞的外侧的细胞壁明显增厚,其细胞壁的外侧 Ca<sup>2+</sup> 分布多<sup>[35]</sup>。

3 结论与讨论

生物柴油产业链包括原料生产、生物柴油生产和消费 3 个环节,分别涉及到农民、生物柴油加工企业和消费者 3 方主体,因此只有在利益博弈中各方的诉求得到同时满足才能使得生物柴油产业链不至于断裂。生物柴油的生产成本大部分为原料成本,然而文冠果座果率极低,导致产量低,只有提高文冠果的价格才能满足农民的利益诉求,但与此同时又会提高生物柴油的原料成本,进而提高产品价格而为消费者所不能接受,从而不能满足生物柴油生产企业或消费者的利益诉求。这是当前我国文冠果生物质能源产业发展的瓶颈问题。虽然通过对文冠果种皮、果壳、饼粕、茎干、叶片等的综合利用来反哺生物柴油有助于此问题的解决,但这些都是废弃物,利用价值一般不会很高,反哺程度相当有限。提高文冠果单位面积产量则可直接降低生物柴油原料成本,从产业链的源头上解决问题,因此我国学者积极开展文冠果的生殖生物学和良种繁育研究,取得了一些积极成果。在生殖生物学方面对文冠果的花器

结构、性别分化、自交亲和程度、异交机制、交配系统、授粉受精、果实发育等进行了研究,但“千花一果”现象形成的原因和克服方法尚需进一步深入;文冠果良种选育工作严重滞后,良种化程度极低;文冠果的组织培养虽取得了一些进展,特别是近年来在体胚诱导方面发展较快,但总的来看仍不成熟,组培繁殖系数低、组培苗生根难、体胚萌发成苗率低等问题尚未解决,组培苗驯化移栽技术还需进一步研究。

“千花一果”是文冠果的生物学特性,受基因控制,是其产量低的内在本质性因素,栽培环境是其产量低的外因,通过栽培技术措施可以在一定程度上提高其产量,但为保障粮食安全,我国生物质能源产业必须“不与粮争地”,只能在边际土地上发展文冠果能源林,立地环境条件受到了限制,因而栽培技术措施对文冠果增产的贡献也受到限制。内因是根本,外因是条件,外因通过内因才能起作用,所以要解决文冠果的低产问题必须通过诱变育种、工程育种等手段改善其“千花一果”的遗传基础。

文冠果作为我国“林油一体化”建设中重点发展的生物柴油原料树种,正在我国北方地区大面积栽植,目前需要大量的优良种苗,而文冠果的良种缺乏,因此在加快良种培育的同时,亟需建立稳定高效的快繁体系,以便将现有良种快速扩繁应用于生产。

参考文献:

[1] 牟洪香,于海燕,侯新村. 木本能源植物文冠果在我国的分布规律研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(9): 3626-3628.  
MOU H X, YU H Y, HOU X C. Regular distribution of woody energy plant *Xanthoceras sorbifolia* Bunge. in China[J]. Journal of Anhui Agri. Sci, 2008, 36(9): 3626-3628. (in Chinese)

[2] 侯元凯,李阳元,赵生军,等. 文冠果结实情况的调查与产量的预测[J]. 经济林研究, 2011, 29(1): 144-148.  
HOU Y K, LI Y Y, ZHAO S J, et al. Fructication investigation and yield prediction in *Xanthoceras sorbifolia* [J]. Nonwood forest Research, 2011, 29(1): 144-148. (in Chinese)

[3] YAO Z, WANG L, QI J. Biosorption of methylene blue from aqueous solution using a bioenergy forest waste: *Xanthoceras sorbifolia* seed coat [J]. Clean - Soil Air. Water, 2009, 37(8): 642-648.

[4] 孙康,蒋剑春,卢辛成. 文冠果皮活性炭的制备及其在甘油脱色脱臭中的应用[J]. 林产化学与工业, 2009, 29(增刊): 77-81.

[5] HAO Y N, WANG X M, PANG F L. Removal of cationic dye from aqueous solution by adsorption on activated carbon developed from *Xanthoceras sorbifolia* Bunge hull [J]. Advanced Materials Research, 2010, 123/125: 367-370.

[6] 范雪层,邓红,李招娣,等. 文冠果蛋白的功能特性及其氨基酸组成分析[J]. 中国油脂, 2009, 34(6): 26-30.

FAN X C, DENG H, LI Z D, et al. Functional properties and amino acid composition of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge protein[J]. China Oils and Fats, 2009, 34(6): 26-30. (in Chinese)

[7] 马养民,王佩. 文冠果化学成分研究进展[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(4): 170-174  
MA Y M, WANG P. Research development of chemical constituents from *Xanthoceras sorbifolia* Bunge [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(4): 170-174 (in Chinese)

[8] 冯继臣. 文冠果开花生物学特性几个问题的初步观察[J]. 林业实用技术, 1981(12): 7-9.

[9] 周庆源,傅德志. 文冠果生殖生物学的初步研究[J]. 林业科学, 2010, 46(1): 158-162.  
ZHOU Q Y, FU D Z. Preliminary studies on the reproductive biology of *Xanthoceras sorbifolia* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(1): 158-162. (in Chinese)

[10] 何宗智. 文冠果花芽分化的观察[J]. 林业实用技术, 1979, (07): 11-14.

[11] 马利苹,王力华,阴黎明,等. 乌丹地区文冠果生物学特性及物候观测[J]. 应用生态学报, 2008, 19(12): 2583-2587.  
MA L P, WANG L H, YIN L M, et al. Biology and phenology of *Xanthoceras sorbifolia* in Wudan area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(12): 2583-2587 (in Chinese)

[12] HU Q, GAO S, LI F. Pistil development in 2 types of flowers of *Xanthoceras sorbifolia* [J]. Forestry Studies in China, 2004, 6(4): 13-16.

[13] 范春霞. 文冠果雄花性别决定中雌蕊败育相关基因的克隆及初步鉴定[D]. 北京:北京林业大学, 2009.  
FAN C X. Molecular cloning and preliminary analysis of pistil aborted associated genes in male flowers of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009. (in Chinese)

[14] 张小方. 文冠果雄花雌蕊选择性败育的细胞生物学观察[D]. 北京:北京林业大学, 2009.  
ZHANG X F. Cytobiology observation of the pistils' selectivity abortion in male flower of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009. (in Chinese)

[15] 高述民,马凯,杜希华,等. 文冠果(*Xanthoceras sorbifolia*)研究进展[J]. 植物学通报, 2002, 19(3): 296-301.  
GAO S M, MA K, DU X H, et al. Advances in research on *Xanthoceras sorbifolia* [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2002, 19(3): 296-301. (in Chinese)

[16] 彭伟秀,王保柱,李凤兰. 文冠果败育花药和花粉发育的解剖学研究[J]. 河北农业大学学报, 1999, 22(3): 35-37.  
PENG W X, WANG B Z, LI F L. The study on the sterile anther and pollen of *Xanthoceras sorbifolia* [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 1999, 22(3): 35-37. (in Chinese)

[17] 马芳. 文冠果生殖生物学与传粉生物学的研究[D]. 银川:宁夏大学, 2009.

[18] 盛德策,丰庆荣,李凤兰,等. 文冠果授粉习性和果实发育规律的研究[J]. 辽宁林业科技, 2010(4): 1-4, 58.

SHENG D C,FENG Q R,LI F L,*et al.* Pollination characteristics and fruit developing law of *Xanthoeras sorbifolia* [J]. Journal of Liaoning Forestry Science&Technology, 2010(4): 1-4, 58. (in Chinese)

[19] 牟洪香. 木本能源植物文冠果 (*Xanthoceras sorbifolia* Bunge)的调查与研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2006.

MOU H X. Investigation and research oil woody energy plant *Xanthoceras sorbifolia* Bunge [D]. Beijing:Chinese Academy of Forestry,2006. (in Chinese)

[20] 丁明秀, 敖妍. 文冠果开花座果研究进展 [J]. 中国农学通报, 2008, 24 (10): 381-384.

DING M X,AO Y. Research progress on the flowering and fruit set of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2008, 24 (10): 381-384. (in Chinese)

[21] 徐东翔. 文冠果落果机理及提高坐果率和种子品质的研究 [J]. 西北植物学报, 1990, 10 (2): 117-127.

XU D X. Studies on the premature drop mechanism, methods of increase fruitage and seed quality of *Xanthoceras sorbifolia* Bge [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,1990, 10 (2): 117-127. (in Chinese)

[22] 乔晓宇. 提高文冠果坐果率的技术措施研究 [J]. 河北林果研究, 2009, 24 (3): 298-300.

QIAO X Y. Methods to enhance fruit set percentage of *Xanthoceras sorbifolia* Bge. [J]. Hebei Journal of Forestry and Archard Research,2009, 24 (3): 298-300. (in Chinese)

[23] 牟洪香, 侯新村, 刘巧哲. 木本能源植物文冠果的表型多样性研究 [J]. 林业科学研究, 2007, 20 (3): 350-355.

MOU H X,HOU X C,LIU Q Z. Study on the phenotype diversity of woody energy plant *Xanthoceras sorbifolia* [J]. Forest Research,2007, 20 (3): 350-355. (in Chinese)

[24] 杨雨春, 赵佳宁, 张忠辉, 等. 文冠果不同群体果实和种子性状综合评价研究 [J]. 中国农学通报, 2011, 27 (16): 36-40.

YANG Y C,ZHAO J N,ZHANG Z H,*et al.* Research on comprehensive evaluation of different group of the fruit and seed traits of *Xanthoceras sorbifolia* [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2011, 27 (16): 36-40. (in Chinese)

[25] 刘克武, 张海林, 张顺捷, 等. 文冠果优良品系选择 [J]. 中国林副特产, 2008(3): 15-18.

[26] GUAN L P, YANG T, LI N, *et al.* Identification of superior clones by RAPD technology in *Xanthoceras sorbifolia* Bge [J]. Forestry Studies in China, 2010, 12 (1): 37-40.

[27] 柳金凤, 吴建华, 闵丽霞. 文冠果组培快繁技术研究 [J]. 江苏农业科学, 2010(2): 52-54.

[28] 任如意, 王书臻, 司徒琳莉, 等. 噻重氮苯基脲对文冠果愈伤组织诱导与分化的影响 [J]. 北方园艺, 2011(6): 127-129.

REN R Y,WANG S Z,SITU L L, *et al.* Study on effects of different concentrations of TDZ on callus induction of *Xanthoceras sorbifolia* [J]. Northern Horticulture, 2011 (6): 127-129. (in Chinese)

[29] 黄永伟, 贾明仁, 王洪波, 等. 影响文冠果组织培养苗离体生根的因素 [J]. 北方果树, 2010(4): 7-9.

[30] 顾玉红, 高述民, 郭惠红, 等. 文冠果的体细胞胚胎发生 [J]. 植物生理学通讯, 2004,40 (3): 311-313.

GU Y H,GAO S M,GUO H H,*et al.* Somatic embryogenesis of *Xanthoceras sorbifolia* [J]. Plant Physiology Communications,2004, 40 (3): 311-313. (in Chinese)

[31] 李晶, 王承义, 舒钰, 等. 文冠果体细胞胚胎发生体系建立 [J]. 北方园艺, 2010(11): 140-143.

LI J,WANG C Y,SHU Y,*et al.* The establishment of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge somatic embryogenesis system [J]. Northern Horticulture,2010(11): 140-143. (in Chinese)

[32] 臧国忠, 陈尚武, 张文, 等. 文冠果子叶同步胚的高效诱导及植株再生 [J]. 西北林学院学报, 2008, 23 (5): 91-94.

ZANG G Z,CHEN S W,ZHANG W,*et al.* Synchronical somatic embryogenesis and plant regeneration of *Xanthoceras sorbifolia* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23 (5): 91-94. (in Chinese)

[33] 刘磊, 顾玉红, 孟坤, 等. 文冠果悬浮细胞系的建立及细胞生长特性 [J]. 林业科学, 2010, 46 (9): 79-83.

LIU L,GU Y H,MENG K,*et al.* Establishment of suspension cell cultures and cell growth characteristics of *Xanthoceras sorbifolia* [J]. Scientia Silvae Sinicae,2010,46 (9): 79-83. (in Chinese)

[34] 顾玉红, 高述民, 李凤兰, 等. 文冠果体胚形态建成过程中的蛋白质组分 [J]. 林业科学, 2011, 47 (2): 53-57.

GU Y H,GAO S M,LI F L,*et al.* Variation in protein expression during somatic embryogenesis of *Xanthoceras sorbifolia* [J]. Scientia Silvae Sinicae,2011, 47 (2): 53-57. (in Chinese)

[35] 顾玉红, 程朋军, 高述民, 等. 文冠果体细胞胚发生中钙的超微细胞化学定位 [J]. 林业科学, 2008, 44 (8): 52-55.

GU Y H,CHENG P J,GAO S M,*et al.* Ultracytochemical localization of Ca<sup>2+</sup> in the somatic embryogenesis of *Xanthocera sorbifolia* [J]. Scientia Silvae Sinicae,2008, 44 (8): 52-55. (in Chinese)