

中国青钱柳繁殖与利用研究进展

邱明萱 张琦琦 焦阳 谢文字 舒文波

(华中农业大学园艺林学学院 武汉 430074)

摘要: 青钱柳作为我国独有且冰川世纪幸存下来的树种,在食用、药用、生态、经济等多方面有着多种用途。为了更深入地了解和利用青钱柳资源,对青钱柳进行更好地开发和推广,本文对青钱柳的繁育方式、良种选育、生长特点、遗传多样性、抗性机理、基因功能等研究进行了综合分析,探讨青钱柳的开发特点和潜力,并对未来良种选择、产业发展、应用价值等方面进行了展望,以期为中国青钱柳资源开发及良种选育提供理论参考。

关键词: 青钱柳;繁育与栽培;基因遗传

中图分类号:S339;S326

文献标识码:A

文章编号:1004-3020(2024)01-0059-07

Research Progress on Breeding and Utilization of *Cyclocarya paliurus*

Qiu Mingxuan Zhang Qiqi Jiao Yang Xie Wenyu Shu Wenbo

(School of Horticulture and Forestry, Huazhong Agricultural University Wuhan 430074)

Abstract: *Cyclocarya paliurus* as a unique tree species in China that has survived the Ice Age, has various uses in food, medicine, ecology, economy, and other aspects. In order to gain a deeper understanding and utilization of the resources of *C. paliurus*, and to better develop and promote *C. paliurus*, this article conducts a comprehensive analysis of its breeding methods, superior variety selection, growth characteristics, genetic diversity, resistance mechanisms, gene functions, and other research. It explores the development characteristics and potential of *C. paliurus*, and looks forward to future superior variety selection, industrial development, and application value, in order to provide theoretical reference for the development of *C. paliurus* resources and superior variety selection in China.

Key words: *Cyclocarya paliurus*; breeding and cultivate; genetic inheritance

青钱柳(*Cyclocarya paliurus*)是从冰川世纪幸存下来且仅存于中国的胡桃科青钱柳属落叶乔木,广泛分布于我国的江西省、湖南省、安徽省、江苏省和福建省等地,一般生长于海拔在420~2500m的山区岩质湿润土地^[1-2]。青钱柳在药用和食用方面有着巨大潜力,目前研究其药用价值较多^[3],它不仅含有铁、锌、硒等丰富的无机营养成分,还含有锰、铁、铜、铬等微量元素^[4-7]。青钱柳的黄酮类、多糖和皂苷含量也极为丰富,能够增强人体免疫力,减少“三高”的影响,抑制炎症和细菌的

生长,并且可以治疗糖尿病,以及缓解痛风等多种病症^[8-24]。此外,青钱柳还具有观赏和经济价值,因其树干通直、材性好、木材轻软、重度硬度适中且种子似一串铜钱,是家具用材和园林绿化的优良树种^[24-29]。

现有的青钱柳人工林很少,主要为零星分布的天然林,这不利于青钱柳的开发利用^[21]。目前已在人工林资源培育、活性物质及其医疗保健药用功能等方面开展了大量研究^[30-32]。鉴于青钱柳广泛的开发应用前景,为了更好地解决青钱柳良种选

* 收稿日期:2023-06-01;修回日期:2023-09-13

基金项目:经济林木种质改良与资源综合利用湖北省重点实验室项目“大别山青钱柳良种选育与繁育体系优化”(202303102);国家重点研发计划专项“主要花卉成华机制及其调控”(2018YFD1000400);华中农业大学园艺林学学院科技创新基金“发根农杆菌介导的青钱柳遗传转化体系的建立”(2023YLSRF14)。

作者简介:邱明萱(1998~),女,硕士研究生在读,研究方向为林业林木遗传育种。

舒文波为通讯作者。

育、繁殖方式、培育技术等方面产生的问题,本文针对青钱柳的培育方式、生长特点、遗传多样性、抗性机理、基因功能等方面进行综述,以期为中国青钱柳产业的发展提供理论依据。

1 青钱柳繁殖技术研究

由于青钱柳天然资源数量少,并且在我国多零星分布,因此加快青钱柳的繁育和保护是当前的研究重点^[33-35],而对青钱柳的栽培技术研究可以分为有性繁殖和无性繁殖两方面^[36]。

1.1 青钱柳有性繁殖

研究表明,在自然条件下青钱柳种子具有深度休眠的生物学特性^[35],影响了树种的繁育,造成了树种数量的稀少,故打破休眠、缩短种子萌发时间、提高发芽效率和苗木成活率成为了繁育研究重点。经研究发现,青钱柳种子休眠主要是由于种壳妨碍了内部对水气的吸收。采用酸蚀和激素相结合的处理方法,可以破除休眠与促进萌发,因为酸蚀有助于解除种皮的机械束缚,降低内源抑制物的作用^[36-40]。而适当的碱处理也可起到相同作用,甚至效果比酸处理好^[41]。两种处理方法的目的是为了能够透水透气,与外界进行水气交换,进而解除种子休眠^[41-43]。在生产应用中,也可用物理方法处理,如打磨、锤击、划破等多种方法加以激素处理可以缩短种子的萌发时间和提高发芽率^[44]。但因不同种源的青钱柳种子形态、休眠程度存在差异,为破除其休眠增添了困难,所以在实际生产中要根据实际情况选择最佳处理方法^[45]。

另外也有研究发现,抑制种子萌发的主要原因并不是种皮结构,而是种子、果皮等多个部位具有某些生物活性物质对萌发产生抑制作用^[36],其各部位的抑制强度为外种皮最强,其次是内种皮和整粒种子^[36-37],双重作用甚至多重作用下使幼胚进入深度休眠状态^[38],其解决方法与上述方法大同小异。

1.2 青钱柳无性繁殖

除播种繁殖以外,青钱柳无性繁殖也取得了一定的进展,主要包括扦插、嫁接和组织培养等。在青钱柳扦插繁育中,对插穗未施以激素处理时扦插生根率近于零^[46],以青钱柳当年生嫩枝为插穗,以激素综合处理后对青钱柳扦插苗生根有明显的促进作用,如使用生根剂 SJCL(64.57%)^[47]、双吉

尔 GGR 6 号(66.4%)^[49]、吲哚丁酸(81.1%)^[53]、ABT 生根粉(83.1%)^[53]等激素后的生根率大部分为 60%以上^[47-53]。在青钱柳嫁接繁殖研究中,有本砧嫁接和异砧嫁接,其中异砧嫁接可以核桃(*Juglans regia*)与枫杨(*Pterocarya stenoptera*)为砧木。研究结果表明,青钱柳本砧嫁接成活率为 53.49%,显著高于以枫杨和核桃为砧木的嫁接组合^[54];以枫杨为砧木,采用劈接方法比枝接和芽接成活率高^[55],以切接为嫁接方时,青钱柳嫁接成活率提高至 95%以上^[56],综上考虑采用嫁接方法繁殖时可采用枫杨+切接方式。对于组培苗培育,发现青钱柳外植体采集的最佳时期是 4 月^[57-58]。采集后的材料经过 0.1%升汞溶液处理 4~8 min 后用无菌水冲洗干净放置于培养基上获得无菌苗^[59-60]。无菌苗也可用种子直接繁殖,繁殖时间要比传统实生繁殖短。在研究中发现,通过酸蚀和综合处理后直接进行无菌培养,在液体培养基中更容易离体培养,繁殖时间要短于层积繁殖^[41,60-61]。另外,以青钱柳茎段、叶片等组织部位为外植体,对影响青钱柳愈伤组织诱导、壮苗、生根诱导的基本培养基、激素种类及浓度等关键因素进行了研究。结果表明,基本培养基 1.0 mg·L⁻¹ 6-BA+1.0 mg·L⁻¹ GA₃+0.3 mg·L⁻¹ NAA 加以改良 MS,诱导茎段愈伤组织效果最好,诱导率可达 100%;以 1.0 mg·L⁻¹ KT+0.5 mg·L⁻¹ 2,4-D+0.3 mg·L⁻¹ NAA 的 MS 培养基中的组合对青钱柳茎、叶诱导愈伤组织效果最佳且生长快,诱导率最高能达到 100%^[62-65]。

2 青钱柳良种选育、栽培技术研究

青钱柳不同种源的遗传力存在差异^[66]。不同地理种源青钱柳的胸径、木材基本密度和微纤丝角存在显著差异,这可为青钱柳材用优良地理种源筛选提供有力支撑^[28-29]。在生产中,青钱柳优树的选择应从多个方面综合考虑。一方面叶片内含物含量、鲜叶重和鲜叶面积可作为青钱柳优树选育指标^[67-69]。如以青钱柳生长量(鲜叶面积、鲜叶重)和活性物质含量为指标,选育出了‘江西赣州’‘安徽黄山’‘云南昆明’‘四川沐川’‘贵州黎平源’^[71,73]‘皖青 1 号’‘皖青 2 号’‘皖青 3 号’^[70,72]等青钱柳品种;另一方面,以青钱柳速生用材和药用为指标,选育出优良速生用材造林种源(‘宜丰种源’‘沐 8’‘沐 9’‘沐 10’‘沐 11 号’‘贵州剑河’‘云南昆明’‘贵州黎平’‘浙江安吉’‘昆明 1 号’‘剑河 2 号’‘剑

河 1 号’‘安吉 7 号’‘昆明 5 号’‘庐山 1 号’‘鹤峰 2 号’‘昆明 2 号’)和优良药用种源(‘安徽歙县’‘广西资源’‘云南昆明’‘江西庐山’‘昆明 5 号’‘庐山 5 号’‘庐山 1 号’‘剑河 3 号’‘庐山 2 号’‘安吉 6 号’‘安吉 7 号’‘昆明 1 号’)[74-75];同时,南京林业大学选育出高产、优质的材叶两用的‘沐川种源’[76]。

在青钱柳培育研究方面,科研人员进行了土壤类别[77]、肥料配比[78-81]、休眠[82]、雌雄交配[83]、实生与萌生生长[37-54]、栽培丰产[84]、用材[28-29]、逆境[85-95]等多方面的研究。青钱柳因具有抗逆性强的特点,所以在不同环境中都能快速适应生长[85-95]。在盐胁迫研究方面,当胁迫加重时,导致幼苗存活率降低;而当处于相同盐胁迫条件下,高温相较于适温,幼苗受胁迫严重[86-89]。在水分胁迫研究中,苗高、地径的增长量及地上部分的生物量随土壤含水率的降低呈现递减趋势,重度水分胁迫影响体内活性物质种类的表达积累,不利于青钱柳幼苗的生长[90-91];在温度胁迫研究中,不同温度会对青钱柳生长和体内活性物质含量造成一定的影响,尤其是青钱柳苗茎中 β -谷甾醇的含量在高温和低温下都有着显著的变化,但对叶片和根的影响不显著[92]。另外发现,在生长前期,青钱柳具有一定的耐阴性,一定程度的遮阴对生长有一定的作用[93-95],并可显著影响黄酮类化合物和根部多糖[95]。

3 青钱柳生长特性与遗传多样性

近年来,研究人员发现海拔、土壤、气候、水质、光照、微生物等因素多重叠加,促使青钱柳种质资源的遗传变得复杂多样,且地域尤为重要[32]。天然群体间存在一定的遗传分化,产生了种内有差别的地理种源,而不同种源的家系间变异较大,且与地理位置无显著相关性[96-97]。不同种源青钱柳在生理特性、基因型等方面存在差异[98]。如青钱柳有多种性别类型[83],其性状变异丰富多样[99],不同部位如叶色、果实大小等存在多种不同类型,且不同地区品种主要化学成分种类及含量均存在一定差异[6,32,100-101];不同种源青钱柳在群体间与群体内,种子的直径、千粒重、体积、复叶性状、地径和苗高内达到显著性差异,以湖北神农架种源的树高变异系数最大,其在种源层次上的变异大于家系层次上的变异[98]。而半同胞家系层面上,苗高和地径的遗传力能够分别达到 0.87 和 0.82[67,69];种源、

部位、栽培技术等方面对青钱柳营养元素和活性物质有明显影响[69-70],且种源家系内有显著变异[71]。另有研究表明,青钱柳活性物质主要由叶、幼根等代谢活动旺盛的器官合成,且不同生长阶段所产代谢物含量存在差异,其中老叶中差异代谢物数量最多[102-103],故 7~10 月树冠中上部成熟叶片中活性物质含量高[96-97],4、7、10 月总黄酮含量最佳[96-97],6~7 月采摘的降血糖作用最佳[104-105],且树龄为 4 a 时可提取到的可溶性多糖较高[106]。

4 青钱柳分子技术研究

在青钱柳转录组和代谢组研究中,主要聚焦生长素影响因子、胁迫基因、生物活性物质代谢等方面。在生长性状的基因研究中,青钱柳幼苗期 CpARF2L 基因存在组织表达差异,且在展开的叶片中表达量最高[107-108];在抗逆研究中,推测 CpMTF9 基因在缓解恶劣环境对青钱柳生长发育具有重要作用[109],且通过 RNA-seq 分析比较了青钱柳内质网胁迫相关基因的表达,发现了适合于生物胁迫处理和其他非生物胁迫中的内参基因[110];在生物活性物质代谢研究中,通过对转录组的差异基因进行分析,鉴定出 13 个参与三萜形成的具有显著差异性表达模式的关键酶基因[111]。在此基础上,为调控青钱柳三萜代谢,研究人员克隆了青钱柳鲨烯合成酶(CpSS)全长基因,且在黑曲霉诱导子作用下,CpSS 基因的表达量显著增加[112-113]。另外也发现,不同生长阶段叶片的代谢物存在差异,老叶中差异代谢物数量最多,多为山奈酚及其糖苷类物质[115]。根据老叶与嫩叶的转录组以及代谢组比较分析,发现萜类和多肽的代谢、辅酶和维生素的代谢、氨基酸代谢在基因表达上调中占主导作用,而信号传输、类脂物代谢与能量代谢为基因表达下调占主导作用[108]。幼嫩叶片含有高氨基酸含量和有机酸含量,因此适宜作为制作青钱柳茶的原材料,而黄酮苷和黄酮醇苷类化合物的成熟叶片,适宜做提取黄酮类化合物等次生代谢产物的原材料[115,102-103]。故转录组和代谢组数据可为青钱柳重要生物活性成分的生物合成和调控提供参考[104]。

5 讨论与展望

青钱柳是一种具有药用、食用、经济和观赏价值的多研究价值的树种。因此,在生产应用中根据不同的开发研究利用方向,综合生长特性、遗传多

样性等内容,开发具有特定目标的青钱柳品种,使其快速繁殖,成为现阶段急需的目标。近年来,青钱柳已在中国一些地区开展了规模化种植且相关开发和利用得到广泛重视,尤其是随着青钱柳药用价值的开发和利用,研究人员陆续对青钱柳种子、枝、叶等部分的功能进行了全面深入的研究和开发,在青钱柳有性繁殖和无性繁殖研究^[37-65]、营养和药用成分^[6-23]、生长培育^[66-96]和抗逆境^[85-95]等方面取得了一些进展,可为后续开展青钱柳药用、材性等方面的应用提供相应的研究内容,也为相应品种选育打下了良好基础,实现高效生产。

在生产中会有不同的实际要求,因此选择不同的优良品种是必由之路。青钱柳叶多为生产应用中的原材料,针对叶用目标,在栽培过程中,可选择合适的其他林木进行混交种植,或采用适当的株行距栽培,或根据青钱柳分枝能力强进行适当截杆,促进青钱柳产生更多的枝叶。在栽培管理过程中采用科学的管理方法和现代农业技术,如适当的遥感技术、生物技术、灌溉、施肥和病虫害防治,以确保青钱柳叶的健康生长,提高青钱柳叶用材料的生产效益;最后选取合理的收获时机对叶片进行收获,以保证叶片的养分含量和质地,并建立叶用材料的品质监测体系,对采收的叶片进行质量检测,确保其符合相关标准和需求。同时,在未来应进一步深入青钱柳活性物质药用作用机制研究,加大对药用作用研发投入,建立青钱柳原料质量控制标准、开发更能满足社会需求的产品,促进青钱柳产业的飞速发展。

参 考 文 献

- [1]安琪. 青钱柳多糖对 RAW264.7 细胞的抗氧化和抗炎作用及机理探究[D]. 南昌:江西农业大学,2020.
- [2]国家林业局国有林场和林木种苗工作总站. 2003. 中国木本植物种子[M]. 北京:中国林业出版社.
- [3]林源. 天然居群青钱柳叶主要生物活性物质及抗氧化活性研究[D]. 南京:南京林业大学,2019.
- [4]袁丛军,刘娜,谢涛,等. 青钱柳叶片活性成分及其影响因素研究进展[J]. 贵州林业科技,2021,49(3):48-53+64.
- [5]陈毓,陈巍,李锋涛,等. 青钱柳化学成分及药理作用研究进展[J]. 畜牧与饲料科学,2019,40(12):61-63.
- [6]章发盛,张学英. 野生树和人工种植青钱柳叶黄酮类物质含量的比较分析[J]. 中国标准化,2018,20:161-164
- [7]赵锦金. 青钱柳、黄连降血糖活性成分研究[D]. 无锡:江南大学,2022.
- [8]胡世一,周雅琴,安宁,等. 青钱柳内生真菌次生代谢产物抗氧化活性研究[J]. 中国民族民间医药,2021,30(18):16-20.
- [9]董彩军. 青钱柳黄酮的测定方法与提取分离及其生物活性研究[D]. 南昌:南昌大学,2007.
- [10]李燕,蔡儒安,潘如梨,等. 青钱柳水提物降血糖及抗炎功效研究[J]. 中国食品学报,2021,21(9):102-109.
- [11]刘均,李强,谭蓉. 青钱柳降血糖作用及其在辅助降血糖代用茶开发上的应用前景[J]. 茶叶通讯,2021,48(4):606-611,622.
- [12]卢振华. 青钱柳叶对糖尿病大鼠血糖、血脂和抗氧化作用的影响[J]. 湖北中医药大学学报,2017,19(1):19-22.
- [13]朱克强. 青钱柳颗粒预防痛风患者初始降尿酸阶段痛风急性发作的临床研究[D]. 南京:南京中医药大学,2021.
- [14]刘敏,王锦,魏开云. 医学界的“第三棵树”——多功能的青钱柳[J]. 云南林业,2017,38(6):62.
- [15]Yang Liu, Yanni Cao, Shengzuo Fang, et al. Antidiabetic Effect of Cyclocarya paliurus Leaves Depends on the Contents of Antihyperglycemic Flavonoids and Antihyperlipidemic Triterpenoids[J]. Molecules, 2018, 23(5).
- [16]叶振南. 青钱柳多糖对大鼠脂质代谢及相关基因表达的影响[D]. 南昌:江西农业大学,2014.
- [17]胡文兵,赵静,陈婷婷,等. 青钱柳多糖对高脂血症小鼠的降血脂作用及机制初探[J]. 现代食品科技,2015,31(11):39-44.
- [18]Zhanwei Yang, Jin Wang, Jingen Li, et al. Antihyperlipidemic and hepatoprotective activities of polysaccharide fraction from Cyclocarya paliurus in high-fat emulsion-induced hyperlipidaemic mice [J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 183.
- [19]刘庆,宋建刚,卢蓉,等. 青钱柳黄酮对幼年免疫低下并肥胖大鼠血糖、血脂、免疫功能的调节作用[J]. 广西医学,2021,43(10):1209-1214.
- [20]黄敬耀,楼兰英,徐鹏. 摇钱树叶的药理研究(简报)[J]. 中药通报,1986(11):61.
- [21]张彩珠,潘盛武,刘纲勇,等. 青钱柳对家兔血液循环的影响[J]. 广西农业科学,2010,41(7):723-725.
- [22]冷任轩. 青钱柳的基础理论研究和临床观察[J]. 江西中医药,1994(2):64-65.
- [23]徐若宸,张鹏,向明. 青钱柳化学成分及抗代谢性疾病药理作用研究进展[J]. 中草药,2023,54(9):2962-2977.
- [24]周莉荫,戴小英,黄丽莉,等. 青钱柳研究进展[J]. 江西林业科技,2007(5):34-38.
- [25]高喜荣,王齐瑞,杨海青,等. 珍稀多用途树种——青钱柳[J]. 乡村科技,2012(10):7. 1674-7909.
- [26]柳誉,梁彦兰,陈存及,等. 混交林中青钱柳生长规律的研究[J]. 南昌:江西农业大学学报,2004(3):381-

- 384,438.
- [27]邓波,杨万霞,方升佐,等.青钱柳幼龄期生长与木材性状表现及其性状相关分析[J].南京:南京林业大学学报(自然科学版),2014,38(5):113-117.
- [28]孙戴妍,尚旭岚,洪香香,等.青钱柳胸径生长和木材密度的地理变异规律[J].南京:南京林业大学学报(自然科学版),2017,41(4):1-5.
- [29]孙戴妍,杨万霞,刘清亮,等.青钱柳天然群体间木材微纤丝角的地理变异趋势[J].南京:南京林业大学学报(自然科学版),2018,42(3):81-85.
- [30]江春艳.不同表型青钱柳叶片总黄酮和多糖含量差异研究[D].南昌:江西农业大学,2015.
- [31]YANG Zhanwei, WANG Jin, Jingen, et al. Antihyperlipidemic and hepatoprotective activities of polysaccharide fraction from *Cyclocarya paliurus* in high-fat emulsion-induced hyperlipidaemic mice [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 183.
- [32]田慧,陈宏夏,黄勇,等.青钱柳种质资源 SCoT 分子标记遗传多样性分析[J].世界科学技术-中医药现代化, 2022, 24(7): 2732-2739.
- [33]洪香香,尚旭岚,方升佐.青钱柳[M].北京:中国林业出版社,2021:70.
- [34]方升佐,尚旭岚,洪香香.青钱柳种子生物学研究[M].北京:中国林业出版社,2017:277.
- [35]查选周.浅析青钱柳苗木培育与综合利用技术[J].农技服务,2015,32(6):140.
- [36]余乐,叶军,陆辉,等.青钱柳的繁育与栽培技术探究[J].农业与技术,2020,40(21):69-71.
- [37]杨万霞.青钱柳种子休眠原因及萌发生理的初步研究[D].南京:南京林业大学,2004.
- [38]尚旭岚,徐锡增,方升佐.青钱柳种子休眠机制[J].林业科学,2011,47(3):68-74.
- [39]上官新晨,郭春兰,杨武英,等.培养基及培养条件对青钱柳愈伤组织生长和黄酮含量的影响[J].福建农业大学学报,2006(6):588-592.
- [40]尚旭岚.青钱柳种子休眠机理及其解除休眠方法的研究[D].南京:南京林业大学,2007.
- [41]杨萍,李晟锐.林木种子的休眠和破除研究综述[J].种子科技,2020,38(6):19-20.
- [42]鲁强.三桠苦种子休眠的解除方法和初步机理研究[D].广州:广州中医药大学,2019.
- [43]张辉,张云芳.青钱柳种子物理方法处理及育苗技术研究[J].绿色科技,2020(5):91-92.
- [44]宋祖祥,邱先华.青钱柳播种育苗技术试验[J].江西林业科技,2004(5):10-11.
- [45]尚旭岚,洪香香,等.青钱柳播种育苗技术规程[S].北京:中国林业出版社,2014.
- [46]夏小华,邱先华,梁永华,等.神茶原科青钱柳扦插繁殖试验初报[J].蚕桑茶叶通讯,1994(2):12-14.
- [47]郭春兰,上官新晨,蒋艳,等.几种生根剂对青钱柳扦插育苗作用的研究[J].江西农业大学学报,2008,30:275-278.
- [48]李娜,朱培林,丰采,等.青钱柳嫁接愈合过程中砧穗生理特性及其与亲和性的关系[J].南京林业大学学报(自然科学版),2021,45(1):13-20.
- [49]邹淑琴.不同基质和生根粉对青钱柳扦插生根的影响[J].江西农业,2020(10):123-125.
- [50]朱宏爱,刘朋,王欢妍,等.不同种类的生根剂对青钱柳嫩枝扦插生根效应的研究[J].农业科技通讯,2018(9):197-199.
- [51]万诗颖,田媛,杨万霞,等.激素配方对青钱柳硬枝插穗营养物质、酶活性及生根的影响[J].经济林研究,2023,41(1):217-224,300.
- [52]王丽霞,张亚雄,刘湘.青钱柳嫩枝扦插育苗技术研究[J].防护林科技,2022(3):24-26.
- [53]王小宁.青钱柳扦插育苗技术研究[J].林业实用技术,2012(4):25-27.
- [54]李娜,朱培林,丰采,等.青钱柳嫁接愈合过程中砧穗生理特性及其与亲和性的关系[J].南京林业大学学报(自然科学版),2021,45(1):13-20.
- [55]张燕,邓思,沈峰杰,等.青钱柳砧穗及品系嫁接亲和力和初探[J].南方农业,2017,11(1):39-40,43.
- [56]丁满萍.青钱柳优良叶用品种选育及高效栽培技术[B].安徽省,绩溪县万禾林业开发有限公司,2019.
- [57]赵琴玘,陈建中,胡立涛,等.青钱柳组培快速育苗研究进展[J].现代园艺,2017(15):5-8.
- [58]胡冬南,蒋艳,吴少福,等.青钱柳组织培养的初步研究[J].江西农业大学学报,2005(1):39-41.
- [59]谢寅峰,张志敏,尚旭岚,等.青钱柳茎段腋芽萌发和丛生芽增殖[J].林业科学,2011,47(1):50-55.
- [60]乔卿梅,程茂高,王新民,等.青钱柳离体胚的组织培养研究[J].广东农业科学,2009(7):68-71.
- [61]尚旭岚,徐锡增,方升佐.青钱柳离体胚的培养及快速繁殖[J].南京林业大学学报(自然科学版),2007(1):101-105.
- [62]上官新晨,郭春兰,杨武英,等.培养基及培养条件对青钱柳愈伤组织生长和黄酮含量的影响[J].福建农业大学学报,2006(6):588-592.
- [63]吴群英,徐庆,李丽亚,等.青钱柳不同外植体组织培养及褐变防止的研究[J].时珍国医国药,2008(8):1872-1874.
- [64]赵文佳.青钱柳红色愈伤组织的诱导和筛选及细胞悬浮培养生产花青素[D].南昌:江西农业大学,2021.
- [65]冯莹,钱莲文,林庆良.不同激素对青钱柳外植体和愈伤组织褐化的影响[J].植物学报,2019,54(5):634-641.
- [66]程珊梅.中国特有属植物青钱柳谱系地理学研究[D].

- 南昌:江西农业大学,2013.
- [67]余诚棋,杨万霞,方升佐,等.青钱柳种源间苗期性状变异分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2010,34(1):34-38.
- [68]陆光斌,高洁,贾晨,等.青钱柳20个半同胞家系子代苗期遗传测定评价[J].四川林业科技,2017,38(4):87-89.
- [69]柏文恋,袁丛军,谢涛,等.黔产青钱柳叶片营养元素含量特征及变异规律[J].中南林业科技大学学报,2022,42(2):36-45.
- [70]黄钺,马玉华,杨少博,等.叶用青钱柳优树的选择及其无性系区域化测定试验[J].安徽农业大学学报,2020,47(6):938-942.
- [71]蓝丽霞,徐展宏,孙操稳,等.青钱柳种质资源评价及其优良家系和单株筛选[J].林业科学研究,2022,35(5):42-51.
- [72]黄钺,丁满萍,马玉华,等.叶用青钱柳新品种‘皖青1号’[J].园艺学报,2022,49(S1):213-214.
- [73]姚瑞玲,方升佐.不同种源青钱柳幼苗叶片形态、生理特征的差异性比较[J].南京林业大学学报(自然科学版),2007(1):106-110.
- [74]方升佐,尚旭岚,沈香香.青钱柳种子生物学研究[M].北京:中国林业出版社,2017:277.
- [75]楚秀丽.不同种源青钱柳苗年生长及叶内含物含量研究[D].南京:南京林业大学,2009.
- [76]沈香香,尚旭岚,方升佐.青钱柳[M].北京:中国林业出版社,2021:70.
- [77]徐子恒,王志康,陈紫云,等.生物菌肥对青钱柳根构型和根系形态的影响[J].中国土壤与肥料,2021(4):258-266.
- [78]李文.配比施肥对青钱柳生长及生理特性的影响[D].长沙:中南林业科技大学,2020.
- [79]王志康.菌肥对土壤原生菌群和青钱柳次生代谢产物积累的影响[D].南京:南京林业大学,2022.
- [80]秦健.氮素对青钱柳生长及次生代谢物积累的影响[D].南京:南京林业大学,2022.
- [81]叶紫云,杨永康,殷红清,等.土壤施硒对青钱柳品质及硒含量的影响[J].湖北民族学院学报(自然科学版),2016,34(3):330-332.
- [82]尚旭岚,徐锡增,方升佐.青钱柳种子次生休眠的发生及贮藏物质的变化[J].南京林业大学学报(自然科学版),2006(2):99-102.
- [83]刘晶晶.雌雄异型异熟青钱柳幼龄林的交配系统研究[D].南京:南京林业大学,2016.
- [84]鄢洪星,周传涛,乐俊峰,等.青钱柳叶用林丰产栽培技术[J].现代农业科技,2023(3):150-153.
- [85]姚瑞玲,方升佐. NaCl胁迫及钙调节对青钱柳根部组织离子分布的影响[J].植物资源与环境学报,2007(2):22-26.
- [86]姚瑞玲.不同种源青钱柳幼苗对渗透胁迫适应机理的研究[D].南京:南京林业大学,2007.
- [87]尤禄祥,姚瑞玲,方升佐,等.盐胁迫下青钱柳叶片发育特征和保水能力的变化[J].南京林业大学学报(自然科学版),2009,33(6):155-158.
- [88]王丽霞,何彦峰.青钱柳引种驯化试验初探[J].特种经济动植物,2020,23(4):22-24.
- [89]李彦强,方升佐,姚瑞玲,等. NaCl胁迫对不同种源青钱柳幼苗离子分配、吸收与运输的影响[J].植物资源与环境学报,2007(4):29-33.
- [90]方建华,柏明娥,朱杭瑞,等.青钱柳幼苗对土壤水分的生长及生理响应[J].浙江林业科技,2015,35(6):40-44.
- [91]盛晓玲.水分胁迫对青钱柳黄酮、多糖和萜类化合物合成的影响及机制探究[D].上海:上海师范大学,2022.
- [92]粟君,尚旭岚,方升佐,等.栽培温度及种源对青钱柳 β -谷甾醇含量的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2011,35(3):1-5.
- [93]李雨霏,郭鹏飞,张小燕,等.遮荫对青钱柳苗期光合特性和生长的影响[J].东北林业大学学报,2021,49(8):6-10.
- [94]邓波,尚旭兰,刘桂华,等.不同季节遮荫对青钱柳生长和主要次生代谢物积累的影响[J].北京林业大学学报,2017,39(9):66-75.
- [95]粟君,方升佐,李彦.温度及种源对青钱柳多糖含量的影响[J].林业科技开发,2011,25(2):52-55.
- [96]楚秀丽,杨万霞,方升佐,等.不同种源青钱柳叶黄酮类物质含量的动态变化[J].北京林业大学学报,2011,33(2):130-133.
- [97]占志勇,罗成凤,颜聪,等.不同种源青钱柳叶片次生代谢物含量及优良单株选择[J].南方林业科学,2022,50(6):6-9,18.
- [98]龚斌,龚春,黄建建,等.青钱柳地理种源生长差异及速生优良种源初步筛选[J].南方林业科学,2018,46(2):4-8.
- [99]黄鹏,毛霞,韩歌,等.雌雄异型异熟青钱柳花发育过程中养分的动态变化[J].南京林业大学学报(自然科学版),2018,42(5):1-9.
- [100]徐谦,王樱颖,陈颖博.青钱柳生长素响应因子CpARF2L的克隆与分析[J].浙江农业科学,2023,64(2):328-333.
- [101]杨万霞.不同种源青钱柳苗期生长及叶药用成分含量的差异性研究[D].南京:南京林业大学,2013.
- [102]肖艺欣,朱锦懋,陈由强.青钱柳叶片总黄酮含量测定及代谢组学分析[J].福建师范大学学报(自然科学版),2022,38(6):60-68.
- [103]金则新,李钧敏,丁军敏.青钱柳不同营养器官次生代谢产物分析[J].安徽农业科学,2007(13):3806-3807.

- [104]林伟达. 青钱柳不同发育时期叶片多糖理化性质、生物活性及其生物合成分子机制的研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2020.
- [105]夏和元,杨玉莹,张丹丹,等. 采收时间及加工方式对青钱柳叶化学成分含量及抗氧化和降血糖活性的影响[J]. 湖北中医药大学学报,2021,23(1):45-49.
- [106]郭亮,李晓铁,秦丽凤. 桂北地区青钱柳不同时期活性成分分析[J]. 四川林业科技,2019,40(6):81-84,114.
- [107]方升佐. 青钱柳地理变异研究[M]. 北京:中国林业出版社,2022:280.
- [108]蒋向辉,苑静,王翔. 青钱柳叶片转录组数据组装及基因功能注释[J]. 华中师范大学学报(自然科学版),2018,52(6):822-831.
- [109]安银,戴星,罗海霞,等. 贵州青钱柳膜结合转录因子CpMTF9的基因克隆及功能鉴定[J]. 现代农业研究,2020,26(11):54-55.
- [110]熊孟连. 青钱柳内质网胁迫相关基因的转录组分析及内参基因验证[D]. 贵阳:贵州师范大学,2020.
- [111]廖李玲,张学文,赵燕,等. 青钱柳叶片甜味性状差异的转录组比较分析[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2023,1-14.
- [112]许小向,尹忠平,刘泽波,等. 青钱柳鲨烯合成酶(CpSS)全长基因的克隆、分析与表达[J]. 中国食品学报,2020,20(2):111-119.
- [113]许小向. 黑曲霉诱导子作用下青钱柳细胞转录组测序及三萜代谢基因差异分析与克隆[D]. 南昌:江西农业大学,2017.
- [114]林伟达,李钧敏. 青钱柳幼嫩与成熟叶片代谢组学数据比较分析[J]. 台州学院学报,2021,43(6):55-62.
- [115]徐若宸,张鹏,向明. 青钱柳化学成分及抗代谢性疾病药理作用研究进展[J]. 中草药,2023,54(9):2962-2977.

(编校:郑京津)

(上接第10页)

- [3]刘春云,方文静,蔡琼,等. 中国落叶松林胸径-树高相关关系的探讨[J]. 北京大学学报(自然科学版),2017,53(6):1081-1088.
- [4]张雄清,张建国,段爱国. 基于贝叶斯法估计杉木人工林树高生长模型[J]. 林业科学,2014,50(3):69-75.
- [5]Arabatzis A A, Burkhardt H E. An Evaluation of Sampling Methods and Model Forms for Estimating Height-Diameter Relationships in Loblolly Pine Plantations [J]. Forest science,1992,38(1):192-198.
- [6]Huang S, Titus S J, Wiens D P. Comparison of nonlinear height-diameter functions for major Alberta tree species [J]. Canadian Journal of Forest Research,1992,22(9):1297-1304.
- [7]Fang ZiXing, Bailey R L. Height-diameter models for tropical forests on Hainan Island in southern China [J]. Forest Ecology and Management,1998,110(1/2/3):315-327.
- [8]Huang S. Ecoregion-Based Individual Tree Height-Diameter Models for Lodgepole Pine in Alberta [J]. Western Journal of Applied Forestry,1999,14(4):186-193.
- [9]乔一娜,杨伟,石孟迪,等. 榆林沙区樟子松人工林胸径-树高生长模型研究[J]. 安徽农业科学,2023,51(8):137-141.
- [10]牛思圆,刘鹏举,雷相东,等. 基于连清样地数据的全国杉木人工林平均木树高-胸径模型[J]. 林业科学研究,2023,36(1):117-123.
- [11]梁瑞婷,孙玉军,李芸. 深度学习和传统方法模拟杉木树高-胸径模型比较[J]. 林业科学研究,2021,34(6):65-72.
- [12]马军. 山西省石膏山林场白皮松胸径与树高相关分析[J]. 山西林业科技,2022,51(3):41-43.
- [13]余昆隆,谭伟,杨靖,等. 基于分位数组合的杉木树高-胸径模型[J]. 中南林业科技大学学报,2022,42(11):94-101.
- [14]李善尧. 樟子松天然林树高-胸径模型及胸径分布规律分析[J]. 林业科技,2018,43(2):10-13.
- [15]魏晓慧,孙玉军,马炜. 基于 Richards 方程的杉木树高生长模型[J]. 浙江农林大学学报,2012,29(5):661-666.
- [16]Song T T, Chen G S, Shi S Z, *et al.* Effects of soil warming on specific respiration rate and non-structural carbohydrate concentration in fine roots of Chinese fir seedlings [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2018,79(6):1043-1051.
- [17]孔雨光,杨传强,王森林,等. 山东省黑杨树高与胸径关系研究[J]. 山东林业科技,2013(4):81-83.
- [18]马小欣,姜鹏,马娇娇,等. 沿坝地区华北落叶松胸径-树高生长模型的研究[J]. 林业资源管理,2015(1):44-49.
- [19]郭卫红,郑庆荣,胡砚秋,等. 山西五台山主要针叶树种树高-胸径曲线模型研究[J]. 湖南林业科技,2022,49(6):72-77.
- [20]娄明华,白超,杨同辉. 宁波石栎-木荷天然常绿阔叶混交林的树高-胸径模型[J]. 林业与环境科学,2021,37(4):46-54.
- [21]李晓晶. 杂种落叶松树高-胸径模型的研究[J]. 林业科技情报,2020,52(4):28-30.

(编校:郑京津)