

杜保国,王金玲,毛艳萍,等. 桉木抗旱性及其混交效应研究现状及展望[J]. 江苏农业科学,2019,47(12):9-12.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.12.002

# 桉木抗旱性及其混交效应研究现状及展望

杜保国<sup>1</sup>,王金玲<sup>1</sup>,毛艳萍<sup>1</sup>,刘雷<sup>1</sup>,杨远兵<sup>1</sup>,张首国<sup>2</sup>,陈光升<sup>1</sup>

(1. 绵阳师范学院生命科学与技术学院,四川绵阳 621000; 2. 河北省木兰围场国有林场管理局,河北围场 068450)

**摘要:**桉木是亚热带地区极具发展前景的优质速生阔叶原料林树种,也是典型的木本非豆科固氮树种,常与其他速生用材树种混交栽植以改良土壤特性。桉木受季节性干旱影响严重,对其在气候变化中的反应和应对机制却知之甚少。加之以往混交造林实践中,桉木多作为伴生树种用于改良土壤,而对于混交造林对其自身的影响鲜有研究。在分析总结桉木抗旱性和混交效应的基础上,研析了需要加强的几个方向,以期能够为深入认识桉木响应干旱胁迫的生理机制以及桉木造林实践提供参考。

**关键词:**桉木;混交效应;季节性干旱;抗旱机制;组学技术

**中图分类号:**S718.43 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2019)12-0009-04

桉木为桦本科(Betulaceae)桉木属(*Alnus*)落叶乔木,全世界有40余种,主要分布于亚洲、欧洲和美洲的寒温带、温带和亚热带地区。我国有桉木11种,其中四川桉木(*Alnus cremastogyne*)与台湾桉木(*Alnus formosana*)是我国桉木人工林的主栽树种。桉木生长迅速(速生丰产林年材积生长量为10~15 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)、轮伐期短,树干端直圆满,材质轻软、纹理直、韧性好、易于加工,木材可用作建筑、家具和造纸等,是亚热带地区极具发展前景的优质速生阔叶纸浆用材树种和工业原料林树种。桉木也是典型的木本非豆科固氮树种,其根系发达,耐瘠薄,改良土壤作用显著<sup>[1]</sup>,在石漠化比较严重的地区也可作为植被恢复和改良土壤的首选树种<sup>[2]</sup>,也是汶川地震滑坡迹地植被恢复中的先锋树种<sup>[3]</sup>,在退耕还林和生态建

设工程中发挥着越来越重要的作用<sup>[1,4-5]</sup>。由于桉木喜水湿,多生于低滩湿地,导致其抗旱性研究的必要性受到质疑。然而,近年来桉木主栽区域季节性干旱频发,严重影响桉木人工林的存活和生产力,但其抗旱性研究亟须深入。另一方面,多年来桉木一直作为柏、杉等人工林的伴生树种,而混交对于桉木自身的影响研究较少。本文对以上2个方面的研究现状进行总结,并研判今后需要加强的方向。

## 1 桉木主要分布区季节性干旱频发,抗旱性研究滞后

我国桉木林区主要在南方亚热带地区,在长江流经的狭长地带内均有分布,适生海拔范围为1 000~3 000 m。其中四川桉木原产区以成都平原为中心,在贵州北部、陕西南部以及甘肃东南部也有分布,湖北、湖南、江苏、浙江等长江中下游地区均成功引种栽培<sup>[6]</sup>。据报道,2003年我国桉木人工林面积已经发展到260万hm<sup>2</sup><sup>[7]</sup>,且近年来桉木苗木需求量剧增,造林面积增长迅速。

水分条件是决定我国大部分地区森林生产力水平的主导因素,也是决定林木生成和生长的决定性因素<sup>[8]</sup>。南方林区是我国用材林的主产区之一,也是我国森林脆弱区或严重

收稿日期:2018-01-31

基金项目:四川省教育厅科研基金(编号:12ZB068);绵阳师范学院科研基金(编号:QD2017A001,MYSY2017PY02)。

作者简介:杜保国(1978—),男,河北张家口人,博士,副研究员,主要从事植物抗逆生物学研究。E-mail:baoguodu@mmu.cn。

通信作者:陈光升,博士,副教授,主要从事森林培育和森林生态的教学和研究工作。E-mail:106180582@qq.com。

[14]钟镇. 知识图谱分析方法的可靠性检验研究——以共词分析为例[J]. 科学学研究,2015,33(5):647-653.

[15]周静怡,孙坦,陈涛. 共词可视化:以人类基因组领域为例[J]. 情报学报,2007,26(4):532-537.

[16]孟微,庞景安. Pajek在情报学合著网络可视化研究中的应用[J]. 情报理论与实践,2008,31(4):573-575.

[17]王宗水,赵红,刘宇,等. 社会网络研究范式的演化、发展与应用——基于1998—2014年中国社会科学引文数据分析[J]. 情报学报,2015,34(12):1235-1245.

[18]孙玺菁,司守奎. 复杂网络算法与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2015:32-63.

[19]De Nooy W. Exploratory social network analysis with Pajek: attributes and relations[M]//Exploratory social network analysis with Pajek. Oxford City: Cambridge University Press, 2011: 605-608.

[20]Dehdarirad T, Vjllarroya A, Barrios M. Research trends in gender differences in higher education and science: a co-word analysis[J]. Scientometrics, 2014, 101(1): 273-290.

[21]李贺,袁翠敏,李亚峰. 基于文献计量的大数据研究综述[J]. 情报科学, 2014, 32(6): 148-155.

[22]Ronda-Pupo A G, Guerras-Martin L A. Dynamics of the evolution of the strategy concept 1962—2008: a co-word analysis[J]. Strategic Management Journal, 2012, 33(2): 162-168.

[23]刘海燕,王宗水,汪寿阳. 我国系统科学与工程研究的演化与发展[J]. 系统工程学报, 2017, 32(3): 289-304, 345.

[24]杨海华,彭洁,赵辉. 国家自然科学基金对纳米材料的资助领域分析——基于共词网络法[J]. 科技管理研究, 2012, 32(1): 23-26.

[25]谢丽斌,董颖,吴德志. 基于Pajek的科研领域合作关系网络特征分析[J]. 图书馆, 2016(7): 62-65.

脆弱区的主要区域<sup>[9]</sup>。从 20 世纪 70 年代开始,我国南方地区降雨显著减少<sup>[10-11]</sup>。近年来我国南方地区频繁发生季节性干旱事件(如 2003 年夏季、2005 年春季、2006 年夏季和 2009 年 10 月至 2010 年 1 月期间)<sup>[12]</sup>,且呈现干旱程度不断加剧、持续时间加长的趋势<sup>[11,13-14]</sup>。其中在 2003 年 7—8 月份,我国南方地区的总降水量比历史同期减少了 30% ~ 80%,突破了 1967 年的历史记录<sup>[13]</sup>。并且在水分特征上,发生在我国南方地区的季节性干旱与西北地区持久的大面积地域性干旱不同,干旱后常伴有强降水发生,季节性干旱之后复水现象普遍<sup>[12,15]</sup>。近年来频发的季节性干旱导致的人工林大幅度减产,给亚热带地区经济发展带来了巨大损失<sup>[16-17]</sup>。如 2003 年发生的特大干旱事件造成了一年生、二年生的四川桉木幼林大面积干死<sup>[18]</sup>。

速生也意味着需要充足的水分和养分供应,因此也对水肥的变化较为敏感<sup>[19-20]</sup>。然而,目前对于桉木的研究多集中在良种选育、丰产栽培、种质资源收集<sup>[5,18,21-26]</sup>以及光合和生长特性等方面<sup>[27-33]</sup>。加上人们习惯性地认为桉木喜水湿,多生于河滩低湿地,导致质疑桉木抗旱性研究的必要性,桉木响应环境胁迫方面的研究相对落后。

## 2 种间和种内不同种源间生长生理特性差异明显

台湾桉木比四川桉木具有更高的单株叶片数量<sup>[34]</sup>、比叶面积和相对生长速率<sup>[33]</sup>,根系的形态和根瘤方面也存在差异<sup>[34]</sup>。自然条件下台湾桉木的最大净光合速率高于四川桉木<sup>[25,29,33]</sup>,生长速度较快,而幼苗叶片的叶绿素含量却较低<sup>[34]</sup>。随着林龄的增加,立地条件差异性对其生长的影响逐渐明显<sup>[35]</sup>。桉木同种不同种源或家系之间在光合特征<sup>[31-32,36]</sup>、蒸腾特性和水分利用效率<sup>[37]</sup>、固氮性状和耐寒性<sup>[38]</sup>以及生长指标<sup>[5]</sup>等方面均存在显著差异。这些种间和种内的表型特征、光合生理特性以及生长的差异性,在一定程度上也说明了其抗逆机制的复杂性。

初步研究表明,水分胁迫导致可溶性糖含量和叶绿素含量降低<sup>[39-40]</sup>,台湾桉木比四川桉木具有较强的耐旱生理适应性,且不同种源之间在形态和生理指标上差异显著<sup>[39-41]</sup>。在正常条件下,四川桉木具有较高的水分利用效率和净光合速率,但在水分胁迫下水分利用效率和净光合速率显著降低,蒸腾耗水明显大于台湾桉木种源,对水分胁迫更加敏感。随着水分胁迫强度增加,四川桉木种源叶片丙二醛增量明显高于台湾种源幼苗,而脯氨酸增量较低,膜脂过氧化程度较重。此外,可溶性糖含量的增加是桉木幼苗适应低温的重要方式,并且台湾桉木可溶性糖含量变化幅度大于四川桉木<sup>[42]</sup>。朱万泽等同时指出脯氨酸的积累虽有一定的渗透调节能力,但这种渗透调节能力十分有限<sup>[40]</sup>。花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)响应高温胁迫的研究中也发现脯氨酸的保护能力有限,而多元醇类(polyols)物质的大量积累可能发挥着重要的作用<sup>[43]</sup>,多元醇类是否也在桉木抗旱中发挥重要作用,尚没有研究报道。

## 3 桉木常被用作伴生树种改良土壤和林分结构

氮是构成蛋白质、核酸、磷脂、叶绿素及氨基酸等化合物的必需成分,与植物的碳代谢紧密联系,在植物的生长、发育

以及逆境响应中发挥着重要的作用。在自然生态系统中,氮素一般较为缺乏,特别是高山丘陵地带,往往氮素是林木生产力的限制因素<sup>[44-45]</sup>。桉木作为非豆科固氮树种,具根瘤,其根叶等组织含氮量高,在土壤改良和增加目标树种生产力、提高林分结构稳定性等方面发挥着重要作用<sup>[46]</sup>。

桉木和柏木(*Cupressus funebris*)的光合作用在日变化和季节变化上存在时间匹配效应,在林木结构上存在光合作用的空间匹配效应,因而能充分有效地利用林地上各层次水平的光能资源,大大提高混交林群体的光能利用效率,使之成为川中丘陵紫色土区的高产林分类型<sup>[47-48]</sup>。桉木和柏木混交之后,混交林群落植物种类和总生物量均明显高于柏木纯林<sup>[49]</sup>,使柏木提前进入速生期,促进了柏木的生长,提高了林分的生产力<sup>[50]</sup>。同时林内相对湿度、土壤水分有效利用率、土壤有机质含量以及表层土壤全氮量均有所提高,最终使柏木生长量平均提高 70% 左右<sup>[51]</sup>。在桉柏混交林根系特征的研究中发现,桉木根系多分布于表层 0 ~ 20 cm,而柏木根系较深,这样既利于利用深层土壤中的水分和养分,又避免了种间根系的过度竞争,提高了对资源的利用效率<sup>[52]</sup>。与桉木混交明显提高了桉柏混交林根库中氮元素的积累量,对提高土壤氮库利用率和加速氮素的生物循环发挥着重要作用。此外,贵阳市喀斯特山地不同树种配置模式下的土壤理化性质研究表明,桉木纯林土壤的有机质、全磷、速效磷和碱解氮含量最高<sup>[53]</sup>。桉柏混交不仅改善了柏木的营养空间和生长条件,提高了地力,同时提高了人工林生态系统的生产力、抗逆性和稳定性<sup>[52]</sup>。

桉木还被广泛用于杉木混交林营造,从而达到改善林分结构、土壤条件、提高生产力的目的。杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国南方特有的速生用材树种,但其针叶养分含量低,分解慢,林地自肥能力差。研究表明与桉木混交后,林分的水源涵养能力<sup>[54]</sup>、土壤的透水和透气性能<sup>[55]</sup>较杉木纯林有了很大的提高。混交林中的杉木平均胸径、树高和单株材积生长量均显著大于纯林杉木,且土壤养分比杉木纯林有所改善,土壤中有有机质和主要营养元素含量,如全氮含量、全磷含量、速效氮含量、速效磷含量、速效钾含量在 0 ~ 80 cm 土层中均有所提高,其中在 0 ~ 20 cm 表层土中最为显著<sup>[55-56]</sup>。混交林下生物量是纯林的 2.41 倍,且植被种类、覆盖率及高度都显著大于纯林<sup>[55]</sup>。除此之外,桉木还被作为桉树(*Eucalyptus grandis*)、茶树(*Camellia sinensis*)以及传统农业生态系统中的伴生树种,来促进凋落物分解、改善土壤条件<sup>[46,57-58]</sup>。

## 4 桉木抗旱性及混交效应研究的几个方向

### 4.1 加强种质选育工作,提高自身抗旱性

不同种源的树种由于长期适应生长地的环境因子,产生了表型和遗传上的差异,因而具有不同的抗性。在自然条件下,四川桉木和台湾桉木种间和种内不同种源或者家系之间由于长期适应当地的气候因子,在形态、生长、光合以及抗性等方面均发生了适应性的变化<sup>[5,39-40]</sup>。如桉木苗高径生长量与苗木根瘤量和叶片含氮量等固氮性状之间存在较高的正相关关系<sup>[59]</sup>,而固氮性能和林木的氮营养往往是限制林木生长的主要因子<sup>[44-45]</sup>。因此通过种质资源的收集、科学的种源选

择,可以选育抗性强、生长快的个体进行无性繁殖育苗。

#### 4.2 加强混交对桉木自身生长和抗逆特征的影响研究

在以前的林分营造中,桉木作为伴生固氮树种用来改善目的树种林分的土壤理化性质,从而达到提高目的树种生产力的目的。随着造林密度的增大,栽植的桉木株数增多,目的树种生长指标呈下降趋势。伴生桉木的单位面积活立木蓄积也与栽植株数成负相关关系<sup>[60]</sup>。因此合理的造林密度和配比是营造混交林的关键节点,合理数量的伴生桉木既能达到改善林分结构和土壤特性、增强对逆境抗性的作用,又不会对目标树种的生长造成影响。要解决这一问题,归根结底还需要借助生态学知识和森林培育理论,从机制层面进行全面的解释,从而指导生产实践。

已有充分的证据表明,与深根性树种混交栽植可以改善林地的水分状况,适度缓解干旱影响<sup>[61-62]</sup>。随着桉木造林的迅猛发展和其面临的季节性干旱问题,混交对于桉木自身的效应研究也应受到重视。桉木根系分布较浅,78%的根分布于0~20 cm土层中,侧向根系发达<sup>[52]</sup>。可以探索以适当比例与深根性树种混交栽植,通过深根性树种对土壤深层水分的利用和再分配改善林地的整体水分状况,从而在一定程度上达到缓解季节性干旱的目的<sup>[61-62]</sup>。

#### 4.3 综合运用代谢组学和转录组学技术揭示桉木响应干旱胁迫的机制

干旱是植物生长与存活最主要的限制因子之一,不可避免的气候变化使干旱形势日益严峻。全面揭示林木对于干旱胁迫的响应机制一直是生态学及其相关学科的研究热点和难点,是迫切需要解决的科学问题<sup>[63-64]</sup>。林木抗旱机制的研究最初主要关注水分胁迫对水势和蒸腾作用、气孔反应、光合作用、叶绿素荧光、抗氧化系统、渗透调节及丙二醛与脱落酸含量的影响<sup>[65]</sup>。随着组学技术的发展,代谢物组学(metabolomics)和转录组学(transcriptomics)已经成为研究植物响应干旱胁迫机制的新兴手段,并被广泛应用<sup>[66-67]</sup>。代谢物组学技术可以对特定生物样品在受到刺激或干扰后其所有代谢产物进行定性和定量分析,可以检测包括糖、糖醇、氨基酸、有机酸、脂肪酸以及大量次级代谢物在内的数百种化学性质不同的可溶性小分子化合物<sup>[68]</sup>,已在拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)、杨树、桉树、花旗松等多种植物对非生物胁迫的响应机制研究中得到了成功的应用<sup>[67,69-70]</sup>。通过分析特定条件下组织或者细胞的转录组,可高通量地获得基因表达的RNA水平有关信息,从而揭示生物体应对生物和非生物胁迫的分子机制<sup>[66]</sup>。代谢物组学与转录组学技术的综合运用可以从生理和分子水平互相印证,克服单一组学的局限性,从而更加全面准确地认识生物系统复杂的响应机制<sup>[71]</sup>,是揭示桉木抗旱机制的必然手段。

#### 参考文献:

- [1] 李苏梅,龙春林,刀志灵. 传统农业生态系统中桉木改良土壤效应研究综述[J]. 植物生态学报,2006,30(5):878-886.
- [2] 刘贤词,文仕恒,冯汉华,等. 四川桉木人工林不同年龄段生物量的研究[J]. 中南林业科技大学学报,2007,27(2):83-86.
- [3] 李丹雄,杨建英,史常青,等. 汶川地震滑坡迹地植被恢复中优势种的种间关联性[J]. 应用与环境生物学报,2014,20(5):938-

- 943.
- [4] 魏鹏,范川,凌银花,等. 台湾桉木林草复合模式细根生物量及形态特征[J]. 林业科学,2014,50(7):157-163.
- [5] 王军辉,顾万春,李斌,等. 桉木优良种源/家系的选择研究——生长的适应性和遗传稳定性分析[J]. 林业科学,2000,36(3):59-66.
- [6] 杨志成. 优良阔叶树种——桉木的分布、生长与利用[J]. 林业科学研究,1991(6):643-649.
- [7] 周永丽,刘福云,万军,等. 四川桉木木材材性初步研究[J]. 四川林业科技,2003,24(1):75-78.
- [8] 刘世荣,郭泉水,王兵. 中国森林生产力对气候变化响应的预测研究[J]. 生态学报,1998,18(5):478-483.
- [9] 李克让,陈育峰. 全球气候变化影响下中国森林的脆弱性分析[J]. 地理学报,1996,51(增刊1):40-49.
- [10] Xin X G, Yu R C, Zhou T J, et al. Drought in late spring of South China in recent decades[J]. Journal of Climate, 2006, 19(13): 3197-3206.
- [11] 李伟光,侯美亭,陈汇林,等. 基于标准化降水蒸散指数的华南干旱趋势研究[J]. 自然灾害学报,2012,21(4):84-90.
- [12] 隋月,黄晚华,杨晓光,等. 气候变化背景下中国南方地区季节性干旱特征与适应 I. 降水资源演变特征[J]. 应用生态学报,2012,23(7):1875-1882.
- [13] Wang L. Review of anomalous climate events in China during 2003 [EB/OL]. [2018-01-07]. <http://bcc.ncc-cma.net/channel.php?id=47>.
- [14] Yang J, Gong D Y, Wang W S, et al. Extreme drought event of 2009/2010 over southwestern China [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2012, 115(3/4): 173-184.
- [15] 彭世彰,吴佳,姚俊琪. 南方季节性干旱成因及抗旱对策[J]. 中国农村水利水电,2012(3):149-151.
- [16] 汪俊三,张更生. 中国典型生态区生态破坏经济损失分析和分区[J]. 环境科学,1996,17(6):5-8.
- [17] 赵其国,黄国勤,马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J]. 生态学报,2013,33(24):7615-7622.
- [18] 吴际友,童方平,龙应忠,等. 四川桉木秋季嫩枝扦插效应分析[J]. 湖南林业科技,2004,31(5):4-6.
- [19] Gholz H L, Ewel K C, Teskey R O. Water and forest productivity [J]. Forest Ecology and Management, 1990, 30(1/2/3/4): 1-18.
- [20] 胡红玲,张健,胡庭兴,等. 不同土壤水分条件下三个速生用材树种幼树的耗水特性比较[J]. 自然资源学报,2012,27(12): 2071-2080.
- [21] 邹高顺. 台湾桉木引种造林及其培肥能力的研究[J]. 福建林学院学报,1995,15(2):112-117.
- [22] 王军辉,顾万春,夏良放,等. 桉木种源(群体)/家系材性性状的遗传变异[J]. 林业科学研究,2001,14(4):362-368.
- [23] 吴际友,龙应忠,童方平,等. 桉木优树选择研究[J]. 湖南林业科技,2004,31(6):10-12.
- [24] 李邀夫,吴际友. 四川桉木的丰产性能及栽培技术[J]. 湖南林业科技,2004,31(1):18-19.
- [25] 周小玲,田大伦,许忠坤. 中亚热带四川桉木与台湾桉木幼林的光合生态特性[J]. 中南林业科技大学学报(自然科学版), 2007,27(1):40-49.
- [26] 杨春惠,谭琼,熊冬连,等. 桉木地理种源/家系选择试验初报[J]. 中南林业科技大学学报(自然科学版), 2008,28(1):64-69.

- [27] 朱万泽,王金锡,薛建辉,等. 四川桉木光合生理特性研究[J]. 西南林学院学报,2001,21(4):196-204.
- [28] 卓仁英,陈益泰. 五种桉木属植物的光合特性初步研究[J]. 浙江林业科技,2004,24(6):1-4.
- [29] 朱万泽,王金锡,薛建辉. 台湾桉木引种的光合生理特性研究[J]. 西北植物学报,2004,24(11):2012-2019.
- [30] 朱万泽,王金锡. 引种台湾桉木的蒸腾特性及其影响因子[J]. 四川林业科技,2005,26(1):9-14.
- [31] 陈明皋,陈建华,徐清乾,等. 4 个桉木品系净光合速率动态特征及其差异性研究[J]. 林业科学研究,2008,21(4):534-541.
- [32] 冯 岑,陈建华,吴际友,等. 4 个台湾桉木无性系光合特性研究[J]. 中国农学通报,2009,25(12):75-78.
- [33] 刘柿良,马明东,潘远智,等. 不同光环境对桉木幼苗生长和光合特性的影响[J]. 应用生态学报,2013,24(2):351-358.
- [34] 饶龙兵,李 阳,郭洪英,等. 5 种桉木属植物苗期生长性状比较研究[J]. 中南林业科技大学学报,2016,36(1):18-25.
- [35] 刘 秀,鲁莹莹,姜 英,等. 广西引种台湾桉木区域试验[J]. 广西林业科学,2016,45(3):301-305.
- [36] 徐清乾,许忠坤,蒋玉璋. 四川桉木引种湖南生长状况及适应性研究[J]. 湖南林业科技,2006,33(6):20-22,30.
- [37] 周小玲,田大伦,张旭东,等. 桉木不同品系蒸腾特性与水分利用效率的研究[J]. 中南林业科技大学学报,2008,28(1):1-7.
- [38] 王军辉,顾万春,张守攻,等. 桉木种源/家系苗期固氮能力的变异及选择[J]. 东北林业大学学报,2004,32(6):4-8.
- [39] 朱万泽,薛建辉,王金锡. 台湾桉木种源对水分胁迫的光合响应及其抗旱性[J]. 水土保持学报,2004,18(4):170-173,181.
- [40] 朱万泽,王金锡,薛建辉. 台湾桉木和四川桉木种源苗木对水分胁迫的生理响应[J]. 西北植物学报,2005,25(10):1969-1975.
- [41] 梁文斌,李志辉,许仲坤,等. 桉木无性系叶片解剖结构特征与其耐旱性的研究[J]. 中南林业科技大学学报,2010,30(2):16-22.
- [42] 陈 朋. 四川桉木与台湾桉木抗寒性初步研究[D]. 雅安:四川农业大学,2010.
- [43] Jansen K, Du B G, Kayler Z, et al. Douglas - fir seedlings exhibit metabolic responses to increased temperature and atmospheric drought[J]. PLoS One, 2014, 9(12): e114165.
- [44] Rennenberg H, Dannenmann M. Nitrogen nutrition of trees in temperate forests - the significance of Nitrogen availability in the pedosphere and atmosphere[J]. Forests, 2015, 6(8): 2820-2835.
- [45] Krapp A. Plant nitrogen assimilation and its regulation: a complex puzzle with missing pieces[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2015, 25: 115-122.
- [46] Binkley D, Senock R, Bird S, et al. Twenty years of stand development in pure and mixed stands of *Eucalyptus saligna* and nitrogen - fixing *Facaltaria mouluccana* [J]. Forest Ecology and Management, 2003, 182(1): 93-102.
- [47] 彭培好,王金锡,胡振宇,等. 人工桉柏混交林生态系统的能量特征[J]. 应用生态学报,1998,9(2):113-118.
- [48] 彭培好,王成善. 人工桉柏混交林光合生理生态机理研究[J]. 四川林业科技,2001,22(4):19-23.
- [49] 王 江. 桉柏混交幼林群落特征及生物量调查[J]. 四川林业科技,1993,14(1):66-69.
- [50] 石培礼,钟章成. 四川桉柏混交林生物量的研究[J]. 植物生态学报,1996,20(6):525-533.
- [51] 邱进贤,柳春生,周继君. 四川盆地柏木、桉木混交林生态效应的研究[J]. 四川林业科技,1981,2(2):1-6.
- [52] 石培礼,钟章成. 桉柏混交林根系的研究[J]. 生态学报,1996,16(6):623-631.
- [53] 魏 媛,吴长勇,孙 云,等. 不同树种配置模式对喀斯特山地土壤理化性质的影响[J]. 贵州农业科学,2014,42(9):81-85.
- [54] 郑兆飞. 桉木杉木混交林水源涵养能力研究[J]. 西南林学院学报,2008,28(3):8-10.
- [55] 徐清乾,许忠坤,荣建平. 杉桉混交效果及机理分析[J]. 湖北林业科技,2008(6):13-17.
- [56] 谢福荣. 杉木桉木混交林生长量与土壤肥力的研究[J]. 福建林学院学报,2006,26(2):161-164.
- [57] 李艳红,杨万勤,罗承德,等. 桉-桉不同混合比例凋落物分解过程中土壤动物群落动态[J]. 生态学报,2013,33(1):159-167.
- [58] 王 彬,董 慧,蒋玉兰,等. 核桃树或桉木与茶树间作对茶叶主要生化成分的影响[J]. 中国茶叶加工,2014(1):29-34.
- [59] 贺超英,陈益泰. 桉木种源苗期生长和固 N 能力的变异[J]. 林业科学研究,2002,15(6):680-686.
- [60] 何正东,彭本德. 柏桉混交造林密度初探[J]. 四川林业科技,1991,12(1):74-76.
- [61] Neumann R B, Cardon Z G. The magnitude of hydraulic redistribution by plant roots: a review and synthesis of empirical and modeling studies[J]. New Phytologist, 2012, 194(2): 337-352.
- [62] Scholz F G, Bucci S J, Meinzer F C, et al. Maintenance of root function in tropical woody species during droughts: hydraulic redistribution, refilling of embolized vessels, and facilitation between plants [M]//Tropical tree physiology. Springer International Publishing, 2016: 227-241.
- [63] Ahuja I, de Vos R C, Bones A M, et al. Plant molecular stress responses face climate change[J]. Trends in Plant Science, 2010, 15(12): 664-674.
- [64] Niinemets Ü. Uncovering the hidden facets of drought stress: secondary metabolites make the difference[J]. Tree Physiology, 2015, 36(2): 129-132.
- [65] 蒋高明. 当前植物生理生态研究的几个热点问题[J]. 植物生态学报,2001,25(5):514-519.
- [66] 祁云霞,刘永斌,荣威恒. 转录组研究新技术:RNA-Seq 及其应用[J]. 遗传,2011,33(11):1191-1202.
- [67] 倪建伟,杨秀艳,张华新,等. 代谢组学在植物逆境胁迫研究中的应用[J]. 世界林业研究,2014,27(5):11-17.
- [68] Fiehn O, Kopka J, Dörmann P, et al. Metabolite profiling for plant functional genomics [J]. Nature Biotechnology, 2000, 18(11): 1157-1161.
- [69] Shulaev V, Cortes D, Miller G, et al. Metabolomics for plant stress response[J]. Physiologia Plantarum, 2008, 132(2): 199-208.
- [70] Du B, Jansen K, Kleiber A, et al. A coastal and an interior Douglas fir provenance exhibit different metabolic strategies to deal with drought stress[J]. Tree Physiology, 2015, 36(2): 148-163.
- [71] Hirai M Y, Yano M, Goodenowe D B, et al. Integration of transcriptomics and metabolomics for understanding of global responses to nutritional stresses in *Arabidopsis thaliana* [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(27): 10205-10210.