

· 科学论坛 ·

基于需求导向的林学基础研究关键科学问题^{*}

赵桂玲^{1**} 李响¹ 曾庆银² 吴福忠³ 陈帅飞⁴
于海鹏⁵ 罗晶¹ 冯雪莲¹

- (1. 国家自然科学基金委员会 生命科学部, 北京 100085;
2. 中国林业科学研究院 林木遗传育种国家重点实验室, 北京 100091;
3. 福建师范大学 地理科学学院, 福州 350117;
4. 国家林业和草原局 桉树研究开发中心, 湛江 524022;
5. 东北林业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150040)

[摘要] 基于第 213 期“双清论坛”, 本文分析了我国林学学科及林业发展所面临的国家需求, 回顾了林学领域近年来取得的主要进展和成就, 剖析了林学基础研究的挑战与机遇, 凝炼了基于国家需求的未来 5—10 年林学基础研究关键科学问题。

[关键词] 林学; 林业; 国家需求; 基础研究; 研究进展; 科学问题

发展林业是美丽中国和可持续发展战略的重要途径, 对于落实习近平总书记提出的“绿水青山就是金山银山”理念, 对实现精准扶贫和新时代乡村振兴具有重大战略意义。林学是以森林和木本植物为主要研究对象, 揭示其生物学现象的本质和规律, 开展森林资源培育、保护、经营管理和利用的一门学科, 是实现林业战略目标的支撑与保障。林学基础研究所产生的数据、理论、方法和技术不仅是推动林业产业转型升级的前提, 更是国家经济发展宏观决策的重要依据。

近年来林学基础研究的领域不断拓展, 队伍不断壮大, 水平显著提高, 这在一定程度上带动了林业的发展。但相当一部分项目申请和立项评审中未能针对林业生产需求选择关键科学问题, 对需求导向、问题导向、产业导向和林业科研的长期性考虑不足。对林木遗传育种、森林培育、森林经营等分支学科方向的内涵认知不清晰、重视不够。盲目复制植物学、作物学、遗传学等学科的研究热点和国际前沿, 跟踪性、同质性研究较多, 而原创性研究较少, 呈现系统性与战略性研究相对薄弱的现象, 无法满足我国新时期林业发展的需求。

研讨林业发展的战略需求, 基于制约我国林业发展的限制因素凝炼科学问题, 将会大力推动新时期林业产业发展和生态文明建设。在此背景下, 2018 年 11 月 7~9 日, 国家自然科学基金委员会生命科学部、化学科学部和政策局联合主办, 中国科学院沈阳应用生态研究所承办了主题为“基于需求导向的林学重大基础关键科学问题”的第 213 期“双清论坛”, 来自国内 31 所高校、研究机构的 42 位专家学者应邀参加了本次论坛。与会专家总结了我国林业发展现状和林学主要研究进展, 分析了林业发展的瓶颈问题, 针对国家需求凝炼了未来 5~10 年亟需解决的关键基础科学问题。

1 新时期林业发展与林学研究面临的挑战

1.1 林业发展现状与瓶颈问题

林业既是基础产业, 更是公益事业, 具有经济、生态、社会等多种功能。森林是生物遗传多样性的“主体基因库”, 也是社会可持续发展的支柱和国家重大可再生战略资源。在当今世界森林资源总体呈下降趋势的情况下, 我国积极推行保护和发展森林资源的基本政策, 实现了森林面积和蓄积量的双增

收稿日期: 2019-02-22; 修回日期: 2019-03-13

^{*} 本文根据第 213 期“双清论坛”的研讨整理。

^{**} 通信作者, Email: zhaogl@nsfc.gov.cn

长,目前人工林面积已列世界第一,在生态环境改善和林业产业建设方面取得了较大成就。随着精准扶贫和乡村振兴国家战略的实施,林业发展备受各级政府和社会各界的广泛关注,迎来了良好的发展机遇。

我国林业发展也面临一些瓶颈和挑战。首先,我国森林资源总量不足。森林覆盖率只有全球平均水平的 $2/3$,人均森林面积仅为世界人均水平的 $1/4$,人均森林蓄积只有世界人均水平的 $1/7$ ^[1]。而且,现有的宜林地 $2/3$ 分布在西北、西南地区,立地条件差,营造林难度越来越大,对林木良种选育及人工林营造技术的研究提出了更高的要求。其次,森林质量有待提高。我国森林每公顷蓄积量只占世界平均水平的 69% ,龄组结构不合理,中幼龄林面积比例比重较大,林木平均胸径较小。林分结构不合理,林分过疏、过密林的面积占乔木林的 36% ^[1]。人工林主要以木材生产为目的,树种单一,生产力低,林分年生长量仅为林业发达国家的 50% ^[2]。因此,精准提升森林质量是林业发展面临的巨大挑战。第三,森林稳定性低。近年来随着全球气候变暖,极端高温和低温、旱害和涝害等自然灾害以及病虫害频繁发生,森林衰退频发,森林生态系统服务功能的可持续发挥难以保证。第四,林业产业效益低下。我国林木资源利用效率明显低于发达国家,林产品的精深加工与高值利用不够,提质增效手段还比较匮乏;产业产品结构不合理,供给侧生态产品不够丰富,低层次重复、粗放型扩张现象依然存在,急需通过科技创新来推进产业的转型升级。此外,林业发展还面临劳动力紧缺、成本上升等问题,生产效率需要提高,亟需研发出森林资源管理的智能化系统及配套设备。

1.2 林学研究的发展机遇与挑战

科技创新是实施科教兴林战略,推进林业科技革命,大力提高林业发展的源泉和动力,新时期林业发展的战略对林学研究提出了更高要求,林学基础研究的必要性与前瞻性备受重视,相关部门也加强了科技投入,我国林学基础研究迎来了良好的发展机遇。同时,植物学、遗传学、材料学、化学和信息学等相关学科研究的发展日新月异,林学与这些基础学科的相关理论、方法和技术的密切交叉,使得林学研究已进入一个快速发展阶段。

但林学研究也面临一些挑战,这主要是由于树木有着不同于草本植物的特点,如多年生、个体高大、世代周期长、近交衰退、有次生木质部、遗传背景

高度杂合、嫁接等无性繁殖方式,使得林学研究具有独特性、复杂性和长期性,研究难度大为增加,这也是林学研究水平与基础生物学差距较大的主要原因。但从研究成果进行分析,当前我国林学SCI论文数量已超美国位居世界第一,论文被引频次与美国并行,但高质量的研究成果同美国仍有一定距离,且较多论文集中于林产化学和木材物理领域,与森林资源培育相结合的研究论文相对匮乏。因此,打破我国林学研究的不均衡性,提高我国林学基础研究的整体质量迫在眉睫。

2 林学基础研究主要进展与展望

2.1 林木遗传育种研究

2.1.1 林木种质资源与遗传多样性

林木种质资源是林木良种选育的原始材料,是国家的重要战略资源。我国是世界公认的物种多样性中心之一,具有丰富的林木种质资源,木本植物就超过9000种,其中具有重要经济价值的树种约1000种,主要造林树种约300种^[3]。近年来通过广泛收集整理我国的林木种质资源,建立了大型种质资源库,拥有林木种质资源已超过一百万份,在原地保存、异地保存和设施保存种质资源方面形成了一定规模,为树木生物学、林木良种选育和分子辅助育种研究提供了宝贵材料。

林木遗传多样性分析是保存、评价和利用种质资源的前提。基于林木自然群体的遗传变异研究可揭示物种的起源。进化历史和群体遗传学特征,同时也是发现重要基因功能的基础。近年来,我国利用物种信息数据库,融合分子生物学、生态学、古植物学以及地质历史等学科理论方法开展了林木遗传多样性研究,阐明了油松、云南松、高山松、铁杉、冷杉、胡杨、山杨等林木的遗传结构与遗传多样性时空格局,以及物种的环境适应性进化机制^[4-6]。

2.1.2 林木功能基因组学

基因组作为物种遗传信息的总和,在解析林木独特性状的遗传基础方面具有不可替代的价值。2006年美国《科学》杂志报道了第一个木本植物毛果杨全基因组序列,标志着基因组学研究已由草本模式植物延伸到林木。目前,我国已经解析了毛竹、银杏、梅花、簸箕柳、胡杨、新疆杨、银白杨、杜仲、橡胶树、桑树、茶树、鹅掌楸、枣树、木麻黄、红树等林木全基因组序列。毛竹基因组测序是第一个由我国科研人员自主发起的林木重大基因组计划,对竹类植物的遗传改良具有重要的推动作用^[7]。破解“活化

石”银杏基因组为树木进化和生命进化的早期事件解析提供了依据^[8]。通过解析橡胶基因组,提出了乙烯刺激产胶的新观点,为橡胶树优异种质的发掘和高产优质遗传改良奠定了基础^[9]。簸箕柳、胡杨、新疆杨、银白杨等杨柳科树木基因组的解析推动了比较基因组学、功能基因组学、群体遗传学等的研究进展。

在基因组层面对林木多个大型基因家族的功能分化机制进行了阐述,发现不同层次上的亚功能化是杨树重复基因被保留的主要机制,亚细胞定位的分化和正选择在杨树基因家族功能分化中扮演着重要角色^[10]。对巨桉 lateral organ boundaries domain (LBD) 基因家族研究发现 LBD 基因调控树干径向和纵向生长,为林木大径材的培育提供了基因资源^[11]。基于毛果杨 221 个转基因株系的转录组、蛋白组、代谢组研究,构建了木质素合成过程的系统生物学模型^[12],并在毛果杨中建立了调控木材形成的重要转录因子介导的多级分层基因调控网络。我国林木功能基因组学研究成果发表在 *Nature Genetics*、*Nature Plants* 和 *Plant Cell* 等期刊上,多篇论文被 *Nature*、*Plant Cell* 等杂志专门撰文评述,实现跨越式发展,部分研究团队已进入国际领先梯队。

2.1.3 林木重要性状形成的遗传基础

解析林木重要性状形成的遗传基础是林木分子定向改良的前提和依据。近年来,我国解析了林木生长发育、抗逆生理、代谢调控等重要性状形成的遗传基础。发现梅花基因组中 6 个串联重复的 DAM 基因和上游丰富的 CBF 结合位点是梅花提早解除休眠的关键因子,从而解释“踏雪寻梅”之说^[13]。发现质膜定位的杨树 1,4- β -葡聚糖内切酶参与水解细胞壁中非结晶态的纤维素,而杨树 1,4- β -甘露聚糖内切酶 PtrMAN6 蛋白参与水解细胞壁中的甘露聚糖,并产生寡糖信号分子进而调节次生细胞壁的合成过程^[14]。发现 MYB115 转录因子通过调控杨树叶片中类黄酮化合物缩合单宁的合成代谢来抑制真菌菌丝的生长,从而抵抗黑斑病、叶锈病等真菌病害对杨树的侵染^[15]。揭示了 AREB1 转录因子与 H3K9ac 协同调控毛果杨干旱胁迫的分子机理^[16]。构建调控木质素生物合成酶动力学代谢流量模型,可定性、定量预测木质素生物合成调控,实现木质素定向改良。

林木生殖器官的发育调控是遗传改良的重点与难点,揭示其生物学机理将为有效控制林木良种繁

育提供理论依据。以油松两性球花突变株为材料,基于基因芯片与 RNA-seq 等高通量基因表达分析,验证了针叶树两性突变材料起源于其雄性部分的理论假说^[17]。系统阐释了杉木种子的休眠循环过程及调控机制,发现木本植物种子具有不同于草本植物的独特生理休眠调控机制,为控制林木种子休眠状态提供了新思路^[18]。发现活性氧引发的依赖于线粒体的细胞程序性死亡在榆树种子老化过程中具有重要作用,为进一步探究延缓林木种子老化的方法提供了重要线索^[19]。目前,我国林学学科在该领域正稳步快速发展,使得我国在该领域的研究团队处于国际先进行列。

在林木遗传育种研究领域也存在着突出的问题,包括育种目标单一、种质资源育种价值评价分析不足、常规育种萎缩、分子育种技术体系欠缺等,综合林木遗传育种发展现状、面临的问题和国家需求,新时期的林木遗传育种应本着多样化育种、快速育种周期和精准育种的原则,进一步通过森林树种遗传多样性研究和常规选种发现育种资源,深入研究其生殖生物学、繁殖生物学、遗传学和栽培学特性;挖掘鉴定决定育种目标性状的关键基因,解析其分子和生理生化机制,建立精准的分子调控模型,构建重要育种目标性状形成的表观遗传调控机制,为分子育种提供物质基础;创建我国主要造林树种的遗传转化、基因组编辑、功能验证平台和模式体系,为分子育种提供技术体系;综合利用优良种质资源、常规育种和分子育种技术,定向培育优良品种,加速育种进程;利用全基因组遗传标记信息对个体进行遗传评估,有效捕获微效基因,对林木复杂性状进行精确预测,实现良种的早期选择,提高良种培育效率。

2.2 森林培育研究

2.2.1 人工林定向培育

近 30 年来,我国在人工林定向培育理论与技术研究上取得了长足进步,为人工林定向培育的理论研究和突破提供了可能。目前,我国桉树、杨树、杉木、落叶松、马尾松等人工林定向培育理论与技术研究方面居国际先进水平。提出了典型生态区域和困难立地条件植被建设中树种选择及配套培育理论和技术;发展了适合不同地域和立地条件的农林复合生态经营理论和技术^[20];初步建立了高效空间配置和稳定林分结构的防护林营造体系^[21]。在人工林定向培育过程中,已逐步从培育树木速生向提高木材质量、调控树木生长发育规律、缩短培育周期等方向发展。在珍贵乡土用材树种和特色经济林

树种培育方面,发展了通过认识关键化学成分的产生过程、生理生化基础和作用机制的基础上,改进培育和采伐模式,定向调控目标产物需求的理论和技术体系,如楠木中的金丝、海南黄花梨鬼脸等稀缺性木材特征以及檀香醇和沉香油等珍贵性活性成分。

2.2.2 天然林更新与多功能培育

近年来,天然林多功能培育已从单一木材获取,发展到生态、社会和经济三大效益兼顾,在关注森林生产力的同时,更加注重发挥生物多样性保育和生态环境质量改善等功能。在森林立地分类、固碳能力、森林更新与综合服务功能等方面都取得了长足的进步^[22]。首先,以个体生态学和群落演替等传统理论为基础的天然林多功能培育正在向系统科学思维(如状态转换、弹性思维和整体思维等)转变,尤其以复杂系统为基础的科学理论在天然林多功能培育中逐步得到重视。其次,以维护生态平衡和提高天然林林分质量的合理采伐和更新抚育理念正在逐步形成,以不断提高森林健康与稳定性及生态效益的森林抚育和多功能经营理论与技术正在不断优化。此外,森林培育措施下生态系统综合功能研究已初具规模,包括森林生产力、固土保肥、水源涵养等单一和综合功能等研究思路正在深化发展。随着新时代我国生态文明建设的不断深化和推进,天然林保护与森林资源质量精准提升是今后相当长一段时间天然林多功能培育领域亟待解决的国家战略需求。

2.2.3 森林土壤生产力与地下一地上过程的关联耦合

森林土壤学已由传统土壤理化特性与林木生长简单关系的认知,发展到由大样地到区域甚至全球同步的控制实验方法,以高通量测序和基因芯片等为代表的现代土壤生物过程,以同位素标记为特点的物质迁移过程,以涡度相关为手段的气候变化应对分析等一些高新现代技术方法的应用,在土壤生物多样性与功能、土壤有机质动态机制、地上一地下相互作用关系、土壤碳库与气候变化等方面不断深入。近年来,我国科学家在细根的定义和属性、生产与死亡、周转与分解过程及影响因素,在根系—土壤和根系—微生物界面的养分活化以及碳和养分迁移,根际激发效应及其机制等方面取得了较好的进展和突破^[23, 24]。一方面,从林木—菌根菌—根际自由生长微生物—土壤的整体视角理解根际土壤有机质周转和养分转化过程及调控机制;另一方面,土壤生物系统调控树木生长和适应性的机制以及各类土壤微生物在土壤养分活化中的作用等理论不断深

化^[25],特别是基于“适地适树适菌”的重要造林树种根际关键微生物类群生理功能及其对林木生长的调控作用正在受到持续关注,部分相关理论和技术已应用于人工林培育实践。

综合森林培育发展现状、面临的问题和国家需求,新时期的森林培育基础研究应该进一步揭示用材林生产力形成与提高理论,加强珍贵乡土用材树种和特色经济林树种目标产物产量与质量提升的理论和技术研究;不断地开展基于森林多样化和多重化的天然林复杂系统多功能培育理论研究,阐释天然林综合效益发挥的基础;阐明光合产物的地下分配特征和机制,精细定量菌丝生产力,理清根际分泌物和根际微生物功能;逐步形成土壤生物与非生物系统调控树木生长和适应性的理论机制,不断发展“适地适树适菌”的森林培育理论,满足新时期林业发展的国家需求。

2.3 森林经营研究

2.3.1 森林资源信息化理论与方法

近年来,我国开展了全国林地“一张图”数据库管理系统的研制,在林分三维可视化模拟、森林资源信息共享、国家重大林业生态工程监测与评价等方面构建了一些信息技术的系统平台^[26]。通过全面有效地构建森林资源数据,我国不断推进实现森林资源和经营状况的实时、动态监测与管理^[27]。由3S(RS、GIS、GPS)技术为主导的集成调查设备逐渐向智能化和精准化的移动便携林业新装备发展,并由技术一体化向空间一体化体系进步^[28]。在森林资源一体化监测方面,我国目前已基本形成以森林资源连续清查为主体的国家森林资源监测体系和以森林资源规划设计调查为主体的地方森林资源监测体系^[29]。森林资源信息管理的决策支持系统正在从集中式向分布式智能决策发展,从单纯的森林资源管理水平向信息服务和智能决策层次提升,从而在高效精准管理森林资源的同时满足生产经营需求^[29]。

2.3.2 森林经营理论与技术

森林可持续经营、森林生态系统经营、森林多功能经营、森林健康经营模式和技术是林业发展的主要方向,面对全球气候变化的挑战,我国森林在向多维度适应性经营方向发展^[30, 31],经营范式呈现出严格保护、近自然多功能经营、短轮伐期经营等多样化的趋势^[32]。在森林可持续经营理论指导下,我国开展了多功能林业的宏观研究,建立了多功能森林经营的理论框架,进行了近自然森林经营、森林健康经

营、结构化森林经营等方面的实践^[33]。经过长期研究与探索,我国在森林多功能经营和生态系统经营等方面取得了一系列研究成果^[34]。

目前,新的林业统计和模型估计方法不断引进和发展,有效地提高了模型的估计精度和应用范围^[29]。森林生长收获模型继续作为森林可持续经营决策的工具,我国建立了森林生长模型与可持续经营标准的联系,建立了林分和经营单位层次的多目标规划模型^[35]。在林分生长预测模型方面,提出了全林整体生长模型的体系和方法^[30]。在天然林、混交林的生长模拟研究方面不断有突破^[29]。针对不同时空尺度和不同结构的生长模型分析及整合成为一种发展趋势^[34]。对于气候变化对森林生态系统影响的模型构建和模拟得到关注^[36]。

综合森林经营发展现状、面临的问题和国家需求,新时期的森林经营基础科学研究应该进一步提升森林资源连续清查的自动化和智能化水平,并提高森林资源信息的准确性和精确性;强化森林生长收获模拟系统和多目标、多要素优化决策体系的构建;加强森林经营措施对森林生态系统结构和功能的影响机制研究;致力于形成中国特色的多功能森林经营理论与技术体系,进而满足国家对森林质量精准提升的要求,实现对森林的健康经营和森林资源的可持续利用。

2.4 森林保护研究

2.4.1 森林有害生物的分类学、生物学和生态学

近年来,我国森林昆虫和森林病原物的分类学研究取得较大发展,随着分子生物学的发展,新的研究技术例如基于多基因的系统发育学结合传统的形态学手段,使研究方式由表及里、由宏观转向微观,补充与完善了传统昆虫和病原物分类方法^[37-39]。我国对重要森林害虫以及病原物的生物学和生态学特性有了比较深入的研究,加强了环境对病虫害发生的影响以及害虫、病原物对气候变化的适应策略研究,明确了一些重要害虫和病原物的种群地理分布以及生态适应性特征^[40-42]。目前,我国对森林生物灾害的研究除关注病原或昆虫本身的生物学特性外,还强化了各生物因素之间以及它们与非生物因素之间的互作关系研究,研究对象从有害生物个体不断延伸到森林生态系统^[43-45]。

2.4.2 森林害虫的生物防治和化学生态控制

近年来,我国在森林有害生物的生物防治研究方面取得了一系列进展^[38]。对一些重要森林害虫

的重要天敌进行了系统的生物学研究,在天敌昆虫生殖与衰老机理研究方面取得一定进展^[46]。揭示了部分重要天敌线粒体基因组及转录组的遗传信息,明确了与成虫寿命相关的基因^[47]。对昆虫信息素、昆虫化学感受机理、昆虫与植物相互作用以及植物—昆虫—天敌(或微生物)三级营养关系等方面研究取得了一系列进展^[48, 49]。在林木诱导抗性机理和害虫克服林木寄主化学防御体系方面揭示了昆虫与林木相互适应以及协同进化的内在机制^[49, 50]。针对林木寄主诱导抗性的研究不断得到关注^[51]。解析了重要有害生物对生态系统的综合影响效应^[38]。

2.4.3 森林火灾发生机理及森林火灾预测预报与监测

主要进行了林火行为包括特殊火行为和极端火行为的测定与计算;针对不同可燃物类型建立了火烧模型^[52];应用景观生态学原理和方法,结合数学方法,研究了火干扰后的森林群落动态;建立和强化了区域统一火险预报系统,建立了计算机网络信息系统,为发布长、中、短期火灾预报提供支持;加强了遥感技术、卫星探测在林火监测上的应用;强化了基于空间信息和火灾气象、林火模型、火灾控制信息等数据库建设,为建立完善的森林防火系统奠定了基础^[53]。

综合森林保护发展现状、面临的问题和国家需求,新时期的森林保护基础科学研究应该进一步强化对森林重要有害生物基础生物学的认知,更加重视有害生物演化机制以及成灾机制的研究;加强森林保护学与林木遗传育种学、入侵生物学、景观生态学等的交叉融合,阐释优良抗生物灾害林木基因型的抗性机制、林木入侵生物的入侵成灾机制和森林有害生物的生态防控机制;强化对森林火灾发生机理、蔓延机制和火灾之后森林生态恢复的研究;形成根据森林类型和灾害差异有针对性的森林灾害防控研究格局。

2.5 森林生物质综合利用研究

2.5.1 木材科学认知与加工利用

主要研究木质化的天然材料与衍生产品,为木质材料的认知和加工利用提供科学依据。近年来,我国学者围绕木材科学基础研究取得了一些重要进展;研究了木材材质遗传与变异规律,探索了木材细胞壁堆积行为及主要成分的构效关系,建立了木材材性与营林培育的关系理论^[54]。揭示了木(竹)材细胞壁尺度上的组分含量差异及分布规律,研究了

细胞壁的纳米力学特征和流变行为,发展了从宏观至组织、细胞及纳米尺度的完整力学表征体系^[55]。揭示了木材在水、热等外界刺激下的热质迁移规律和降解破坏历程,发展了木材物理学、木材干燥学、木材流变学等基础理论和方法^[56]。提出了木材仿生智能化的学术理念,建立了木材性能防护机制及其功能性改良的理论基础,发展了木材高温热处理、激光处理、压缩处理、强化处理、防腐处理、阻燃处理等技术体系,实现了细胞壁内的低分子量单体聚合及交联酯化,细胞腔内的有机-无机杂化复合改性,木材表面纳米涂层和高分子涂层防护兼具疏水、自洁、防霉抑菌、耐紫外等功能特性^[57,58]。揭示了木材单元(单板、纤维、刨花、木束等)的高效解离、胶合重组和结构优化机制,建立了与异质组分的界面调控、增强增韧及成型加工方法,发展了木塑复合材、木材-橡胶复合材、木材-无机质复合材等生物质复合材料科学理论与技术^[59,60]。

2.5.2 森林生物质纤维综合利用

主要研究木质纤维材料的结构、组成和性质,为其加工利用和高附加值转化提供科学依据。近年来,我国学者围绕此方向的基础研究也取得了较多重要进展:解析了林木“木质素-碳水化合物复合体”的结构及外源刺激下的转变规律,建立了木质纤维组分的溶剂分离转化和生物转化的科学策略及对应方法,产品得率和品质日益提升;在这一基础上遵循和发展“生物质炼制”科学理念,越来越多具有功能性的生物质材料、具有高附加值的生物基能源和化学品被研发报道^[61]。创建了纳米纤维素的制备新理论和新方法,对木质纳米结构的功能应用策略进行了拓展,发展了基于木基纳米结构的多维体系构筑及其在化工催化、生物医药、能源存储等新兴领域的应用^[62]。开创了纤维素的碱-尿素水溶剂体系,完善了离子液体溶解纤维素的机理研究,建立了微生物发酵转化生物乙醇的科学机理和控制策略;解析了半纤维素的高效溶出及定向转化为功能糖、糠醛的过程机制^[63]。对木质纤维及木质素的热化学转化过程及液化、碳化产物的多途径利用进行积极探索,开发了高品质的炭材料和系列生物基高分子材料,实现了利用金属催化剂催化不同种类的木质素定向转化为高热值烷烃^[64-66]。此外,基于林源分泌物的松脂化学和油脂化学高品质利用、基于林源提取物的天然化合物成分的结构发现、有效成分提取、分离和纯化方法也得到了积极发展^[67]。

综合森林生物质综合利用发展现状、存在的问

题及面对的国家需求,新时期的森林生物质综合利用基础科学,应该更加重视林木细胞壁结构和组构效关系,从新角度更广泛地阐释生物质的内涵,得出共性关键规律;进一步挖掘森林生物质自身的生物学属性和材料学特性,重视多学科交叉和新技术的联合运用,助推其高效和功能化的利用;开展前沿探索和重大技术两个维度的基础研究,特别是加强战略性创新基础研究,争取基础研究领跑和技术全面突破;重视基础研究向产业需求技术的转化,加强创新研究对传统学科注入新内容和当前林业产业升级转型发展的助推作用。

3 基于国家需求的未来5~10年林学基础研究关键科学问题

本次双清论坛经大会报告、分会场报告、发言和研讨,与会专家针对当前林业发展的国家战略需求,对林学学科关键基础科学问题,展开了热烈的讨论,并建议未来5~10年围绕以下九个科学问题开展原创性研究。

(1) 林木特有性状和重要代谢产物形成的分子机制。解析林木特异性性状形成的分子机制,包括木材形成早期的形成层细胞发生及维持机制、次生壁组分的生物合成机制、经济林木性别分化和自交不亲和性、药用树种中有效成分的生物合成途径;阐明林木特有性状形成的表观遗传机制。

(2) 林木基因型与环境互作机制。解析林木逆境适应的遗传基础及调控机制;阐明林木季节性生长发育的分子机制;解析林木成花与童期调控机理;揭示典型生态区适地适树的遗传学基础;解析林木响应全球气候变化的分子机制。

(3) 林木群体遗传多样性。解析我国重要森林树种遗传变异的格局及成因,揭示重要森林树种及其近缘种遗传多样性的形成和维持机制;建立种质资源精准鉴定与评价技术体系,筛选核心种质。

(4) 森林生态服务功能的调控机制。基于顶级群落与多功能经营相结合的次生林演替理论,构建分区分类分级的森林精准培育理论和技术体系,揭示森林生态服务功能形成过程与调控机制。

(5) 人工林生产力形成与调控机制。构建现有低产低效人工林近自然转换与质量精准提升的多功能培育理论;阐明基于目标产物和关键功能的人工林定向培育理论;揭示人工林土壤肥力提高机制及其对森林生产力的贡献潜力。

(6) 森林多维信息获取与精准经营。通过森林

精准多维信息获取,提高森林资源调查的高效性和精度,促进森林资源数据构建的一体化、立体化、智能化、集成化;建立精准的森林生长收获模拟系统和多目标优化决策平台,加强森林经营措施对森林生态系统结构和功能的影响机制研究;实现森林质量的提高和功能的提升。

(7) 森林重要有害生物演化灾变机制与防控。解析重要有害生物的遗传多样性以及在生物灾害发生过程中物种、种群的变化动态;解析重要生物灾害发生流行规律;揭示环境变化下森林生物灾害变化趋势及原因;为森林重要生物灾害的防控提供理论指导。

(8) 木材结构解译与品质改良。解析细胞壁主要成分堆积机制与材性基因调控机理,加强人工林营林措施对木材构造和性能方面影响的深入研究;在木材多维结构与性能关系的研究基础上,对木材使用过程中易产生应力集中并最终致其破坏的弱相结构进行优化和材质提升;深入研究木材组织结构与活性功能单元之间的介质迁移、能量传导、选择性结合等过程的互作规律,实现木材液体渗透理论及改良技术、木材高效脱脂技术、化学交联和改性材增韧等方面的关键技术突破;解析木材组分与多元复合界面的结构演变、失效破坏及微观力学等科学机理。

(9) 林木生物物质主要成分构效与转化调控机制。加强基因编辑等生物学手段对森林生物物质组分构效形成的调控,并推动其对应性转化利用的研究发展;提出木质纤维“抗解聚屏障”的科学破解机制和纤维成分清洁高效分离方法;建立木质纤维及主要成分的分子修饰及定向重组科学理论;探寻林木生物物质全组分高效利用和精准转化的科学路径;发展非木质资源如林源新物质的形成、化学特征、体内富集、代谢调控和提取利用的基础理论创新;促进生物物质材料和废弃物的回收与循环再利用。

林业是经济社会可持续发展的基础,在应对气候变化、防治水土流失和荒漠化、促进改善民生等方面发挥着重要作用。尽管我国已成为林业大国,但伴随着经济的高速发展,林业资源也过快地被消耗,林业面临着木材安全和生态安全的双重压力。本期双清论坛针对林木特殊性状和林业重大问题,提出了未来5~10年基于需求导向的林学亟需解决的关键基础科学问题,以期能够为我国新时期林学研究和林业发展提供科学参考。

致谢 感谢第213期“双清论坛”会议主席中国林业科学研究院张守攻院士、中国林业科学研究院林产化学工业研究所蒋剑春院士、中国科学院沈阳应用生态研究所朱教君研究员以及所有参会代表、全体专家共同凝炼了基于需求导向未来5~10年林学重大基础关键科学问题。

参 考 文 献

- [1] 国家林业局. 第八次全国森林资源清查结果. 林业资源管理, 2014, 1: 1—2.
- [2] 周霆, 盛炜彤. 关于我国人工林可持续问题. 世界林业研究, 2008, 21(3): 49—53.
- [3] 国家林业局. 全国林木种质资源调查收集与保存利用规划(2014—2025年). 中国林业年鉴. 北京: 中国林业出版社, 2015.
- [4] Ma T, Wang K, Hu Q, et al. Ancient polymorphisms and divergence hitchhiking contribute to genomic islands of divergence within a poplar species complex. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(2): E236—E243.
- [5] Gao J, Wang B, Mao JF, et al. Demography and speciation history of the homoploid hybrid pine *Pinus densata* on the Tibetan Plateau. Molecular Ecology, 2012, 21(19): 4811—4827.
- [6] Cun YZ, Wang XQ. Phylogeography and evolution of three closely related species of *Tsuga* (hemlock) from subtropical eastern Asia: further insights into speciation of conifers. Journal of Biogeography, 2015, 42(2): 315—327.
- [7] Peng ZH, Lu Y, Li LB, et al. The draft genome of the fast-growing non-timber forest species moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla*). Nature Genetics, 2013, 45(4): 456—461.
- [8] Guan R, Zhao YP, Zhang H, et al. Draft genome of the living fossil *Ginkgo biloba*. GigaScience, 2016, 5(1): 49.
- [9] Tang CR, Yang M, Fang YJ, et al. The rubber tree genome reveals new insights into rubber production and species adaptation. Nature Plants, 2016, 2(6): 16073.
- [10] Ren LL, Liu YJ, Liu HJ, et al. Subcellular relocalization and positive selection play key roles in the retention of duplicate genes of *Populus* class III peroxidase family. The Plant Cell, 2014, 26(6): 2404—2419.
- [11] Lu Q, Shao FJ, Macmillan C, et al. Genomewide analysis of the lateral organ domain gene family in *Eucalyptus grandis* reveals members that differentially impact secondary growth. Plant Biotechnology Journal, 2018, 16(1): 124—136.
- [12] Wang JP, Matthews ML, Williams CM, et al. Improving wood properties for wood utilization through multi-omics integration in lignin biosynthesis. Nature Communications, 2018, 9: 1579.
- [13] Zhang QX, Chen WB, Sun LD, et al. The genome of *Prunus mume*. Nature Communications, 2012, 3: 1318.

- [14] Zhao YJ, Song DL, Sun JY, et al. *Populus* endo-beta-mannanase PtrMAN6 plays a role in coordinating cell wall remodeling with suppression of secondary wall thickening through generation of oligosaccharide signals. *Plant Journal*, 2013, 74(3): 473—485.
- [15] Wang LJ, Ran LY, Hou YS, et al. The transcription factor MYB115 contributes to the regulation of proanthocyanidin biosynthesis and enhances fungal resistance in poplar. *New Phytologist*, 2017, 215(1): 351—367.
- [16] Li S, Lin YJ, Wang P, et al. Histone acetylation cooperating with AREB1 transcription factor regulates drought response and tolerance in *Populus trichocarpa*. *Plant Cell*, 2019, 31(3): 00437.
- [17] Niu SH, Yuan HW, Sun XR, et al. A transcriptomics investigation into pine reproductive organ development. *New Phytologist*, 2016, 209(3): 1278—1289.
- [18] Cao DH, Xu HM, Zhao YY, et al. Transcriptome and degradome sequencing reveals dormancy mechanisms of *Cunninghamia lanceolata* seeds. *Plant Physiology*, 2016, 172(4): 2347—2362.
- [19] Wang Y, Li Y, Xue H, et al. Reactive oxygen species-provoked mitochondria-dependent cell death during ageing of elm (*Ulmus pumila* L.) seeds. *The Plant Journal*, 2015, 81(3): 438—452.
- [20] 方升佐. 人工林培育: 进展与方法. 北京: 中国林业出版社, 2018.
- [21] 姜凤岐, 朱教君, 曾德慧, 等. 防护林经营学, 北京: 中国林业出版社, 2003.
- [22] 沈国舫, 翟明普. 森林培育学(第二版). 北京: 中国林业出版社, 2011.
- [23] Ma ZQ, Guo DL, Xu XL, et al. Evolutionary history resolves global organization of root functional traits. *Nature*, 2018, 555(7694): 94—97.
- [24] Chen G, Hobbie SE, Reich PB, et al. Allometry of fine roots in forest ecosystems. *Ecology Letters*, 2019, 22(2): 322—331.
- [25] Delgado-Baquerizo M, Oliverio AM, Brewer TE et al. A global atlas of the dominant bacteria found in soil. *Science*, 2018, 359(6373): 320—325.
- [26] 许等平, 李晖, 庞丽杰, 等. 全国林地“一张图”数据库建设及扩展应用. *林业资源管理*, 2015, (5): 36—43.
- [27] 张煜星, 许等平, 任怡, 等. 全国林地资源数据服务平台体系框架和运行机制研究. *遥感信息*, 2015, 30(2): 126—130.
- [28] 郭庆华, 苏艳军, 胡天宇, 等. 激光雷达森林生态应用—理论、方法及实例. 北京: 高等教育出版社, 2018.
- [29] 刘国强, 张会儒, 李凤日, 等. 森林经理. 林业科学学科发展报告(2016—2017). 北京: 中国科学技术出版社, 2018.
- [30] 张会儒, 唐守正. 我国森林多功能经营的理论与技术体系. 南方林业发展问题研究——第九次南方森林经理理论与实践座谈会暨南方林业发展论坛论文集. 北京: 中国林业出版社, 2013.
- [31] 刘世荣, 代力民, 温远光, 等. 面向生态系统服务的森林生态系统经营: 现状、挑战与展望. *生态学报*, 2015, 35(1): 1—9.
- [32] 唐守正, 雷相东. 加强森林经营, 实现森林保护与木材供应双赢. *中国科学: 生命科学*, 2014, 44(3): 223—229.
- [33] 国家林业局主编. 中国森林可持续经营国家报告. 北京: 中国林业出版社, 2013.
- [34] 国家林业局主编. 全国森林经营规划 2016—2050. 北京: 中国林业出版社, 2018.
- [35] 王璞, 段劼, 马履一, 等. 森林生长与收获模型国内外研究进展. *广东农业科学*, 2012, 39(17): 173—177.
- [36] Liu SR, Wu SR, Wang H. Managing planted forests for multiple uses under a changing environment in China. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 2014, 44(S1): S3.
- [37] 吕全, 张星耀, 梁军, 等. 当代森林病理学的特征. *林业科学*, 2012, 48(7): 134—144.
- [38] 杨忠岐, 王小艺, 张翌楠, 等. 以生物防治为主的综合控制我国重大林木病虫害研究进展. *中国生物防治学报*, 2018, 34(2): 163—183.
- [39] Li GQ, Liu FF, Li JQ, et al. *Botryosphaeriaceae* from *Eucalyptus* plantations and adjacent plants in China. *Persoonia*, 2018, 40(1): 63—95.
- [40] 张星耀, 吕全, 梁军, 等. 中国森林保护亟待解决的若干科学问题. *中国森林病虫*, 2012, 31(5): 1—6.
- [41] Zhao LL, Zhang XX, Wei YN, et al. Ascariosides coordinate the dispersal of a plant-parasitic nematode with the metamorphosis of its vector beetle. *Nature Communications*, 2016, 7: 12341.
- [42] Zhou LF, Chen FM, Xie LY, et al. Genetic diversity of pine-parasitic nematodes *Bursaphelenchus xylophilus* and *Bursaphelenchus mucronatus* in China. *Forest Pathology*, 2017, 47(4): e12334.
- [43] Zhao LL, Lu M, Niu HT, et al. A native fungal symbiont facilitates the prevalence and development of an invasive pathogen-native vector symbiosis. *Ecology*, 2013, 94(12): 2817—2826.
- [44] Yang ZQ, Wang XY, Zhang YN. Recent advances in biological control of important native and invasive forest pests in China. *Biological Control*, 2014, 68: 117—128.
- [45] Lu M, Huler J, Sun JH. The role of symbiotic microbes in insect invasions. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2016, 47(1): 487—505.
- [46] 王晓红, 杨忠岐, 张彦龙, 等. 灭幼脲对锈色粒肩天牛成虫生殖系统及取食产卵的影响. *环境昆虫学报*, 2012, 34(2): 178—183.
- [47] 骆有庆, 温俊宝, 石娟, 等. 森林昆虫. 林业科学学科发展报告(2016—2017). 北京: 中国科学技术出版社, 2018.
- [48] Zhou FY, Xu LT, Wang SS, et al. Bacterial volatiles ammonia regulates the consumption sequence of D-pinitol and D-glucose in a fungus associated with an invasive bark beetle. *The ISME Journal*, 2017, 11(12): 2809—2820.
- [49] Cheng CH, Wickham JD, Chen L, et al. Bacterial microbiota protect an invasive bark beetle from a pine defensive compound. *Microbiome*, 2018, 6(1): 132.

- [50] Zhao LL, Zhang S, Wei W, et al. Chemical signals synchronize the life cycles of a plant-parasitic nematode and its vector beetle. *Current Biology*, 2013, 23(20): 2038—2043.
- [51] 叶建仁, 张星耀, 梁军, 等. 森林病理. 林业科学学科发展报告(2016—2017). 北京: 中国科学技术出版社, 2018.
- [52] 赵璠, 舒立福, 周汝良, 等. 林火行为蔓延模型研究进展. *世界林业研究*, 2017, 2: 46—50.
- [53] 舒立福, 刘晓东. 森林防火学概论. 北京: 中国林业出版社, 2016.
- [54] 江泽慧, 姜笑梅, 等. 木材结构与其品质特性的相关性. 北京: 科学出版社, 2008.
- [55] 费本华, 余雁, 黄安民, 等. 木材细胞壁力学研究进展. *生命科学*, 2010, 22(11): 1173—1176.
- [56] 吕建雄, 蒋佳荔. 木材动态黏弹性基础研究. 北京: 科学出版社, 2015.
- [57] 秦理哲, 林兰英, 傅峰. 木材胶合界面微观结构样品制备新方法—激光烧蚀技术. *林业科学*, 2018, 54(4): 93—99.
- [58] 李坚, 吴玉章, 马岩, 等. 功能性木材. 北京: 科学出版社, 2018.
- [59] 吴义强, 李新功, 左迎峰, 等. 农林剩余物无人造板研究进展. *林业工程学报*, 2016, 1(1): 8—15.
- [60] Liu R, Peng Y, Cao JZ, et al. Comparison on properties of lignocellulosic flour/polymer composites by using wood, cellulose, and lignin flours as fillers. *Composites Science and Technology*, 2014, 103: 1—7.
- [61] Zhao G, Yu ZL. Recent research and development advances of wood science and technology in China: impacts of funding support from National Natural Science Foundation of China. *Wood Science and Technology*, 2016, 50(1): 193—215.
- [62] Chen WS, Yu HP, Lee SY, et al. Nanocellulose: A promising nanomaterial for advanced electrochemical energy storage. *Chemical Society Reviews*, 2018, 47(8): 2837—2872.
- [63] Cai J, Zhang L. Rapid dissolution of cellulose in LiOH/urea and NaOH/urea aqueous solutions. *Macromolecular Bioscience*, 2005, 5(6): 539—548.
- [64] Xu JM, Jiang JC, Hse CY, et al. Renewable chemical feedstocks from integrated liquefaction processing of lignocellulosic materials using microwave energy. *Green Chemistry*, 2012, 14(10): 2821—2830.
- [65] Yu J, Wang JF, Wang CP, et al. UV-absorbent lignin-based multi-arm star thermoplastic elastomers. *Macromolecular Rapid Communications*, 2015, 36(4): 398—404.
- [66] Liang ZC, Kang M, Payne G F. Probing energy and electron transfer mechanisms in fluorescence quenching of biomass carbon quantum dots. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(27): 17478—17488.
- [67] 刘军利, 蒋剑春. 创新驱动林产工业绿色发展. *生物质化学工程*, 2018, 52(4): 40—48.

The key scientific questions for demand-oriented basic researches in forestry

Zhao Guiling¹ Li Xiang¹ Zeng Qingyin² Wu Fuzhong³
 Chen Shuaifei³ Yu Haipeng⁵ Luo Jing¹ Feng Xuelian¹

(1. *Department of Life Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085;*

2. *State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091;*

3. *Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007;*

4. *China Eucalypt Research Centre, Chinese Academy of Forestry, Zhanjiang 524022;*

5. *Material Science and Engineering College, Northeast Forestry University, Haerbin 150040)*

Abstract Based on the 213th Shuang-Qing Forum, this article reviewed the recent advances and achievements in forestry, and analyzed the national demands in forestry discipline and forestry industry developments in China. Moreover, we also proposed the challenges and opportunities in basic forestry research, and the key scientific questions for the coming 5~10 years according to the national demands in forestry.

Key words forestry discipline; forestry industry; national demands; basic research; research advances; scientific questions