

· 研究进展 ·

# “木材高效利用结构调控与定向重组机制” 国家自然科学基金重大项目结题综述

赵桂玲\*

国家自然科学基金委员会 生命科学部, 北京 100085

**[摘要]** 国家自然科学基金重大项目“木材高效利用结构调控与定向重组机制”于2019年1月启动,2023年12月结题完成。本文概述了项目历时5年所取得的重要研究进展,包括创新提出了木材弱相结构理论,阐明了速生人工林木材多维弱相结构失效及增强调控机制;提出了木材细胞壁差异化定向软化策略,阐明了次生壁 $S_1/S_2$ 层节能解离新机制,深化了木材纤维层面的精准解离与可控功能重组基础认知;揭示了木材主要组分定向转化及其聚集态结构调控机制,引领木质功能新材料在3D打印、手性光学、磷光余辉防伪等领域中的应用发展国际前沿。对未来木材天然结构解译与重组、主要化学组分定向转化、功能化调控机制等木材高效利用基础研究重要发展方向进行了展望,并提出发展建议。

**[关键词]** 重大项目;人工林木材;结构调控;定向重组

木材具有固碳、可再生、可降解和可循环利用等优点,是国家绿色发展的重要战略资源。我国是全球林产品生产、贸易第一大国,以木材为原材料的木材加工产业总产值已突破3.5万亿元。然而,我国优质木材供需矛盾突出,珍贵阔叶木材绝大部分依赖进口;木材工业主要以初级、直接加工为主,在国际产业链分工中处于中低端位置。速生人工林木材一直是我国国产木材供给的主要来源,然而实木材质差、木材纤维精准解离难的问题,导致速生人工林只能低附加值利用。如何通过科技创新解决人工林资源高效高值利用,弥补我国木材结构性短缺,推进产业转型升级和战略型新兴产业培育,是我国林产工业高质量发展所面临的重大挑战。

## 1 “木材高效利用结构调控与定向重组机制”重大项目的立项与实施

为巩固提升我国林业工程领域基础研究创新能力,支撑引领林产工业高质量发展,国家自然科学基金委员会(以下简称“自然科学基金委”)于2019年1月启动“木材高效利用结构调控与定向重组机制”重大项目,资助金额1644万元,是迄今为止我国林



赵桂玲 博士,研究员,国家自然科学基金委员会生命科学部环境与生态科学处处长。

业工程领域第一个重大基础研究项目。该项目聚焦产业重大需求和学科国际前沿,针对我国木材刚性需求与低利用效率之间的矛盾,围绕“木材高效利用结构调控与定向重组机制”这一核心科学问题,以杨树、马尾松、杉木三大主要速生人工林木材为研究对象,开展木材多维结构互作及调控、木材纤维精准解离与界面调控、木材主要组分分子修饰及超分子结构演化、木材组分定向解聚及可控重组四个方向创新性研究。项目的主要创新性成果如下。

## 2 项目取得的主要研究成果

### 2.1 提出了木材弱相结构理论,深化了人工林速生木材增强调控认知

创新提出了木材弱相结构理论,解译了外部条

件作用下不同尺度木材弱相结构的协同失效破坏模式,阐明了速生人工林木材多维弱相结构失效及增强调控机制,从木材多维结构视角深化了对木材天然结构与调控的基础认知。

### 2.1.1 基于木材弱相结构理论解译木材失效破坏机制

针对速生人工林木材材质差、难以实木化利用的难题,项目组立足木材自身的多尺度结构特征,创新提出了“木材弱相结构”理论。木材弱相结构是指木材多尺度结构在载荷、水分、火热、微生物等外部条件作用下,最先失效破坏的木材结构位点。木材的多尺度结构是决定木材性能及加工利用的关键因素,木材性能也与其所处的环境等外部条件密切相关。针对木材实木化利用存在的主要失效类型,项目组开展了木材多尺度结构对其性能的协同影响机制以及多种外部条件作用下的木材结构演化与失效机制研究<sup>[1, 2]</sup>。建立了木材多维弱相结构的表征体系,分别从组织、细胞、壁层和组分四个尺度解译了木材的弱相结构,发现了不同外部条件作用下不同尺度木材弱相结构的关键结构位点。采用原位可视化的表征技术手段,揭示了木材多尺度结构在外部条件作用下的有序失效破坏模式<sup>[1, 3]</sup>;构建了外部条件作用下木材弱相结构失效模型并进行了验证,系统揭示了木材多维结构的协同失效机制,阐明了木材多尺度结构特性与木材干燥、燃烧、力学等性能的构效关系<sup>[2, 4]</sup>。

### 2.1.2 构建木材多维弱相结构增强调控机制

项目组以速生人工林木材弱相结构的精准高效增强为目标,构建了基于化学法增强木材弱相结构的新方法。提出了以聚合物与细胞壁可控复合装配调控载荷响应行为为核心手段的木材力学弱相增强

新策略,创制了层状压缩协同细胞腔填充、细胞壁可控环状增厚、壁腔复合两步增强等速生人工林木材力学性能增强改性方法体系,突破了现有木材改性方法增重率高、可控性差的技术瓶颈问题<sup>[5, 6]</sup>。同时,提出并证实了木材弱相结构非酶降解假说,创新了基于铁离子螯合钝化与有机杀菌剂抑制协同作用的木材防腐增强处理方法(图1),构建了有机-螯合绿色高效木材防腐处理体系<sup>[7]</sup>,精准提升了木材防腐性能,为木材高效保护提供理论及技术支持。相关研究丰富了人工林木材材质改良的理论内涵,为人工林木材高值化利用、缓解我国优质实木资源匮乏问题提供了科学依据与技术保障。

### 2.1.3 建立基于木材弱相结构的木材可视化数据库

基于木材弱相结构理论建立了木材数据库。该数据库依托中国数字木材标本馆,聚焦常用人工林树种马尾松、杉木和杨木,梳理木材多维结构互作及调控机制课题研究数据,通过整合木材多维结构数据信息,建立了与载荷、水分、火热、微生物、光老化作用下木材性能变化相应数据信息,精准定位不同外部条件作用下的木材多维弱相结构<sup>[1, 2]</sup>,是国内首个基于弱相结构理论建立的木材数据库(数据库网址 <https://cafw.specimen.mirror.iwood.ai/#/weakSpecimens>)。

该数据库涵盖了308幅木材切面构造图像,1757条木材构造特征、构造力学、组分含量以及物理、生化及协同条件下木材结构性能信息。木材弱相结构数据库促进了木射线、树脂道等木材弱相结构对象的科学探究<sup>[8]</sup>,也为木材弱相结构理论创新奠定了数据基础。已搭建的数据存储系统有机结合了关系型数据库、文件系统以及数据缓存中间件等

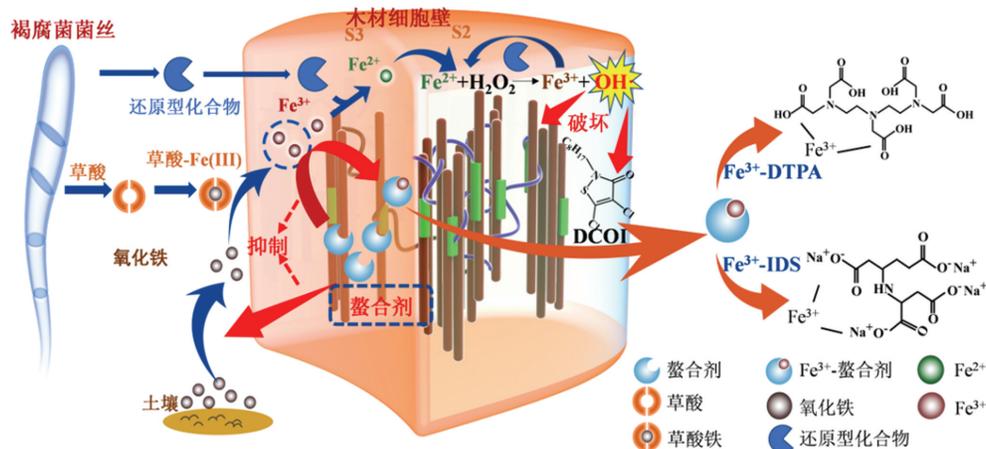


图1 木材褐腐弱相结构失效机制及靶向增强处理方法

存储策略,不仅满足了木材弱相结构多样化数据的存储需求,而且确保了良好的数据库扩展性,可保障我国 2 500 种乔木木材弱相结构数据全覆盖汇集与展示。

## 2.2 深化木材纤维层面的精准解离与可控功能重组基础认知,为传统木材加工产业转型升级和战略性新兴产业萌生与培育提供理论支撑

提出木材细胞壁差异化定向软化策略,解析了次生壁  $S_1/S_2$  层节能精准解离新机制,创新木材纤维稳态界面胶合重组新方法,阐明了木材纤维微尺度定向修饰与仿生功能重组机制。

### 2.2.1 基于木材细胞壁差异化定向软化策略阐明次生壁 $S_1/S_2$ 层节能解离新机制

传统木材纤维解离理论重点强调纤维超微结构中木质素的“限阈”软化作用,忽视了纤维素/半纤维素的作用及液体扩散的方向性,存在着纤维解离工程路径长、能耗高、精准性差等重大难点问题。项目组基于木材三大组分微区化学限阈特征及强化细胞壁层渗透的方向性的新思路,提出了木材细胞壁定向软化和次生壁节能精准解离新理论。根据针/阔叶木材纤维结构和组分差异化特征,采用强化木材纤维次生壁浸渍和渗透新策略,在低于木质素软化点下使阔叶材胞间层(CML)木质素仍处于结壳状态(天然弱相),而细胞壁  $S_1/S_2$  层优先被软化(诱导弱相)而发生解离,显著降低解离能耗。揭示了低于木质素软化点的阔叶木材杨木纤维  $S_1/S_2$  层解离新机制(图 2),实现了从传统天然弱相复合胞间层到诱导弱相  $S_1/S_2$  层的定向软化与节能精准解离<sup>[9]</sup>。比较而言,相同氢键结合程度下针叶木材纤维的解离能耗分别为阔叶木材纤维的 1.23 倍( $S_1/S_2$  层解

离策略)和 1.11 倍(CML 层解离策略),针叶木材纤维更适宜采用胞间层软化解离策略。上述木材纤维定向软化和  $S_1/S_2$  层节能精准解离新理论为木材纤维高效解离和木材纤维高质利用提供了基础理论。

### 2.2.2 木材纤维稳态界面胶合重组新方法

针对纤维板产业深度依赖胶黏剂及功能单一等制约我国纤维板产业高质量发展的瓶颈问题,项目组创新性采用木材纤维表面基团精准氧化活化及生物分子定向修饰策略,提升纤维表面官能团反应活性,构建了稳态共价键和离子键界面胶合重组型态,显著提升了自胶合和胶合界面力学、耐水性能。解译了纤维活性羟基与金属多酚网络等多元互作形态及重组机制<sup>[10]</sup>,揭示了纤维本体表面基团羟醛转化及共价键组装自胶合界面形成、重组、融合互锁作用机理,创制了绿色、低碳、高性能无胶自胶合纤维板及兼具阻燃、抗菌、防水、调湿功能的异质重组纤维板(图 3),建立了稳态化学键缔合型态的木材纤维界面胶合重组新方法<sup>[11]</sup>,为推动纤维板产业提质增效和结构优化,拓展木材纤维在高端绿色复合材料领域的应用提供理论与技术支撑。

### 2.2.3 木材纤维微尺度定向修饰与仿生功能化

从木材细胞壁  $S_1/S_2$  层解离得到的木材纤维具有帚化程度高、反应活性位点丰富、可修饰性强等特点,是精细合成特定微纳界面、定向组装功能集集体、高效创制功能化材料的优质单元。项目组采用限域调控、定向活化及化学交联等策略对木材纤维微尺度界面进行调控,揭示湿、热、化学耦合作用下木材纤维微尺度界面活性官能团演变规律,实现木材纤维微尺度界面定向化学修饰(图 4),建立了木材纤维表面官能团“反应活性热力图”,为木材纤维

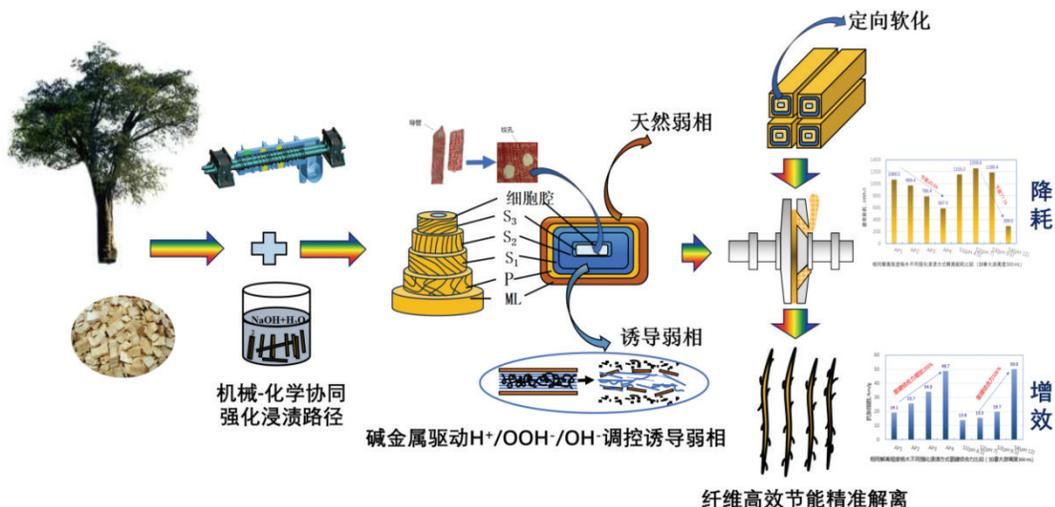


图 2 木材纤维次生壁定向软化与节能解离新机制示意图

功能重组奠定了理论基础<sup>[12]</sup>。通过功能组装和交互作用设计合成了木材纤维超亲疏、高耐磨、强阻隔、强吸附等特殊微纳界面,探明了在调控因子影响下木材纤维与异质功能单元间的相互作用,建立了多尺度/多功能木材纤维复合理化特性与界面调控因子之间的响应关系,阐明了以功能为导向的木材纤维多元界面调控机制。基于增材制造、取向冷冻、高能离子刻蚀等技术手段,构建了平行层状多级木质纤维仿生网络、木质纤维“砖—泥”多层结构等集聚体,实现了木材纤维与聚合物、金属纳米粒子、无机成分等异质单元的定向功能重组,构筑系列强效阻燃、高活性催化、高效储能等功能的木材纤维基新型功能材料<sup>[13, 14]</sup>,为木材纤维增值利用和战略性新兴产业萌生与培育提供理论与技术指导。

**2.3 揭示了木材主要组分定向转化及其聚集态结构形成调控机制,引领木质功能新材料在3D打印等先进制造领域应用的国际前沿**

提出纤维素和木质素定向修饰和协同转化新策

略,揭示了自组装超分子结构演化规律,阐明大分子自组装结构演化机理,深入解析自组装材料在3D打印、手性光学、磷光余辉防伪等应用领域的构效关系。

**2.3.1 纤维素大分子的定向转化重组及功能化机制**

3D打印市场规模近年来具有20%以上的年均复合增长率,打印基材的稳定性和绿色可持续是制约产业发展的重要问题。项目将纤维素转化成可聚合大分子单体,揭示了纤维素可控修饰、纤维素分子转化成纤维素基丙烯酸酯树脂低聚物的分子转化机制和3D打印策略下的纤维素分子可控性重组机制,突破了纤维素树脂化及光催化3D打印技术问题,开发了可再生性、环保性以及生物相容性优异的纤维素基3D打印材料<sup>[15]</sup>,可在医疗、汽车、导电材料及传感器等领域应用。针对现有的纤维素水凝胶力学和导电性能难以协调的技术问题,借助纳米膨润土与纤维素分子形成强配位键合作用,阐明了纤维素—Al配位键合作用下的纤维素自组装机制,揭示了纤维素与纳米膨润土间存在强相互作用力,有

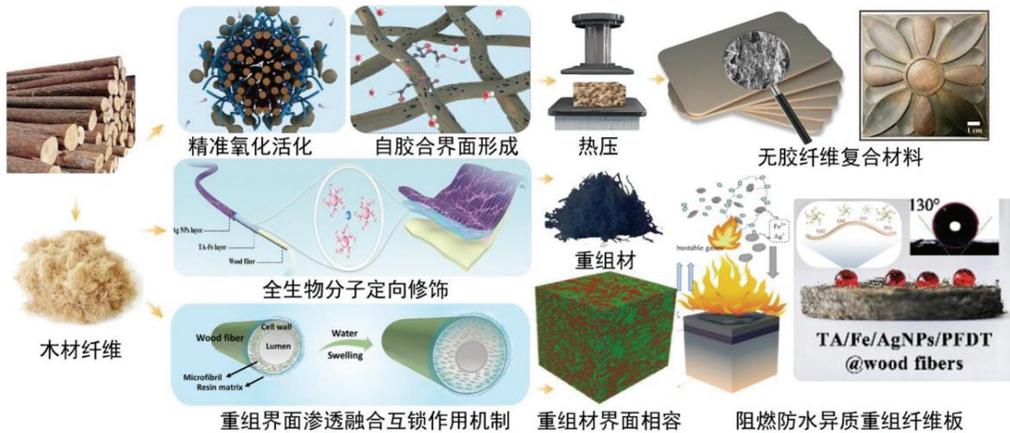


图3 木材纤维稳态界面胶合及其功能化重组复合

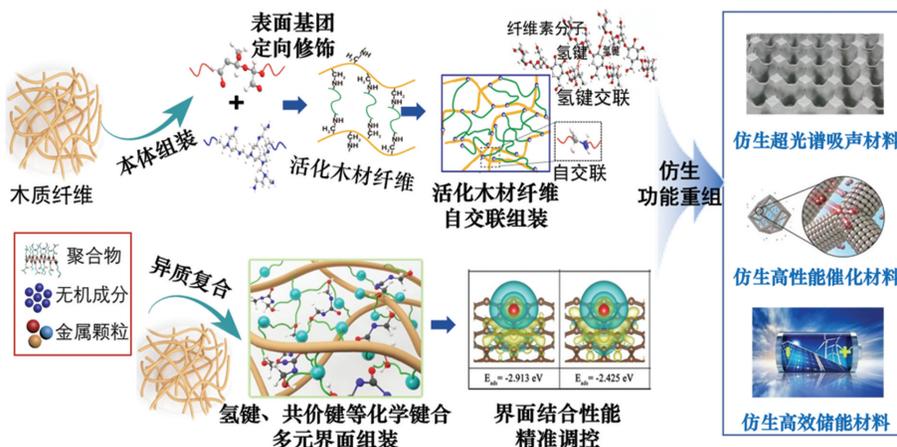


图4 木材纤维表面定向修饰与仿生功能化重组

效抑制了纤维素的水合效应,构建了具有高强度、高离子电导率和低温耐受性的纤维素—膨润土超分子水凝胶,利用产生的纳米限域效应大幅提升导电性能,可作为生物传感器实现对人体运动和生理信号的稳定监测,在柔性可穿戴领域具有极大的应用潜力<sup>[15, 16]</sup>。项目阐明了基于相变结构可逆作用下的改性纤维素自组装构效关系和结构演化机理,实现了室温条件下纤维素水凝胶向气凝胶的低碳高效转换,开发的纤维素超分子气凝胶展现出高强度、可降解和闭环回收性,建立了常温常压下的纤维素气凝胶干燥工艺,与传统冷冻干燥法相比节约能耗 90% 以上(图 5)<sup>[17]</sup>。

### 2.3.2 纤维素分子定向解聚机制及光学功能化

针对纤维素分子水解中间产物异构化的问题,阐明了纤维素分子水解过程的择形催化演化机制,明晰了 5-羟甲基糠醛(5-HMF)精准路径的选择规律,通过催化剂位点、协同外场调控开环反应、稳定烯醇中间体等实现了 5-HMF 定向转化<sup>[18-20]</sup>,为进一步转化多种高附加值化学品、拓宽纤维素应用新领域奠定了基础。受自然界黄金甲虫外壳左旋排列的甲壳素微纤维能够反射左旋圆偏振光特性的启发,项目阐明了纤维素重组过程的调控规律,通过溶剂调控自组装纤维素纳米晶重组手性虹彩材料,成功实现左旋光和右旋光的分离<sup>[21]</sup>,创制出具有圆偏振极化特性的纳米纤维素材料(图 6)。利用与发光

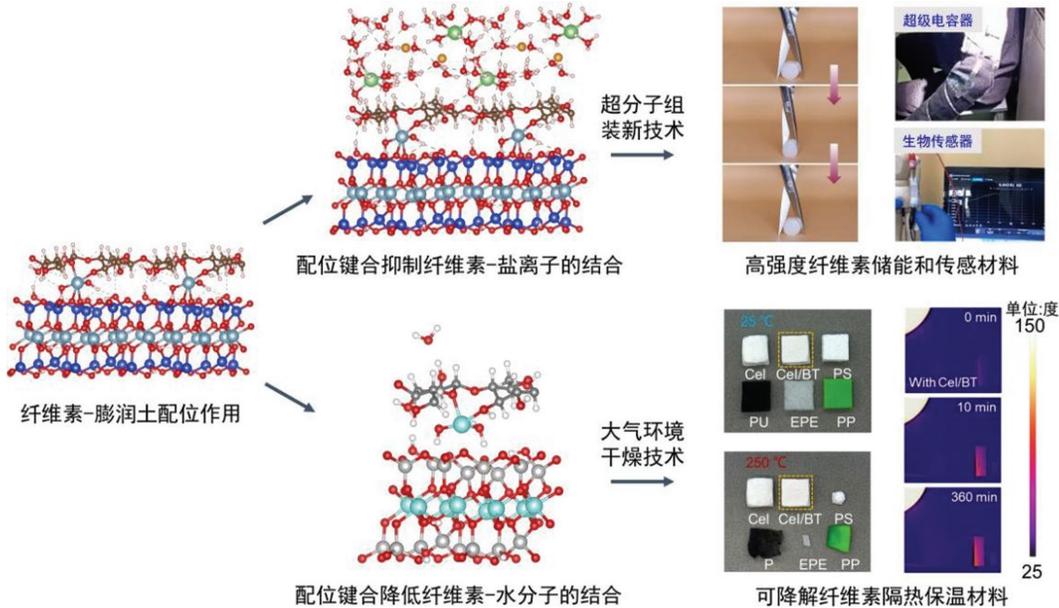


图 5 基于纤维素—无机粒子的配位键合作用构建纤维素水凝胶电子器件和泡沫隔热材料

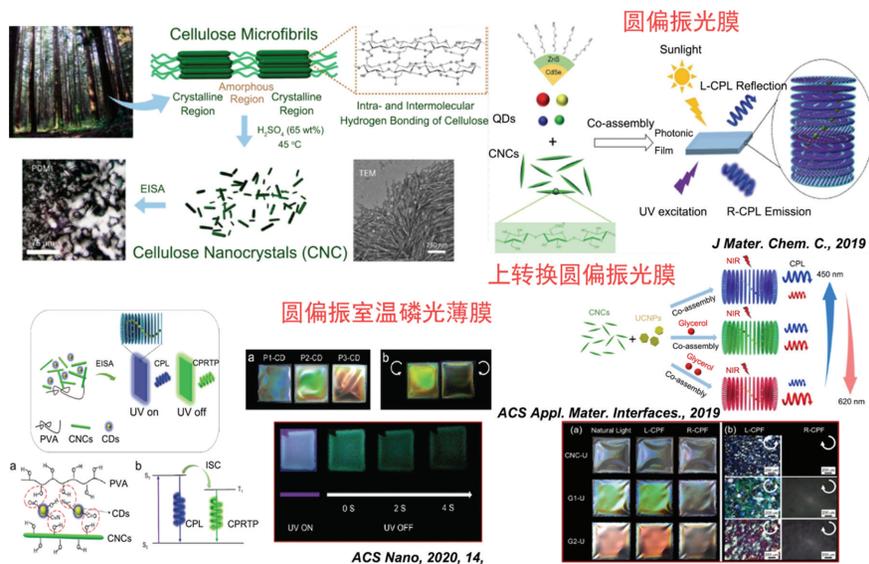


图 6 纤维素定向重组手性光学功能材料

炭点客体的氢键作用,产生圆偏振室温磷光,重组了光学过滤器、防伪材料或新型智能光学显示器<sup>[22, 23]</sup>。该纤维素光学薄膜可诱导非手性超分子向手性结构转变,揭示了手性螺旋结构的形成机理<sup>[24, 25]</sup>。纤维素手性光学材料有望在光学防伪、光化学不对称材料研发以及诱导合成手性光学化合物等领域做出积极贡献<sup>[26]</sup>。

### 2.3.3 木质素定向修饰分子的光热转化及磷光余辉应用

木质素新型分子构效规律的深入揭示及新型光功能材料的构建,有助于突破木质素高值化利用的技术瓶颈。项目阐明了木质素苯环结构单元在本征状态下的超分子堆积规律,探明了苯环超分子结构对木质素光学吸收特性的强化机制,明晰了苯环超分子结构在光激发下所形成激子的非辐射跃迁行为,揭示非辐射跃迁对木质素光热特性形成的促进机制。同时,项目通过分子活化增酚,利用“酚-铁”络合,对木质素苯环超分子结构进行调控,探明木质素吸收光谱与非辐射跃迁特性在络合作用下的宽化与增强机制,实现了木质素光热效率的有效提升<sup>[27]</sup>。在此基础上,发现木质素与异质基质进行超分子组装时,当其分子运动被异质单元胁迫,呈现出“受限余辉”发光行为<sup>[28-30]</sup>。揭示了“受限余辉”的形成机制为受限木质素三线态激子辐射跃迁所产生的室温磷光发射,阐明了溶剂、温度与化学键型对木质素与基质超分子复合限域诱导发光的影响机制,并探明了木质素受限发光在基质种类变化时的演化规律,开辟了木质素高值化新的应用研究方向(图7)<sup>[31-35]</sup>。上述研究推动了木质素在新

型生物质基防伪油墨与光固化材料产业化应用进程,为木质素高附加值利用提供重要理论与技术基础。

## 3 总结及展望

### 3.1 项目研究成果的影响力及引领性

以木材为主的木材加工产业是国民经济重要组成部分并展现出巨大潜力,尤其是作为可再生碳资源,世界各国持续加强木材细胞壁结构解析与可控重组、化学组分绿色定向转化等林木生物质高效转化利用的基础研究与关键技术攻关,创新先进高效的转化途径,实现传统工业过程和产品向低碳、高效绿色工业和环境友好型新产品的转变,优化资源高效可持续利用模式,培育战略性新兴产业。项目团队通过5年的辛苦努力,在 *Nature Communication*、*Nature Reviews Chemistry*、*Advanced Materials*、*Cell Reports Physical Science* 等国际/国内知名期刊发表SCI论文226篇,影响因子大于5或学科TOP期刊收录的论文134篇;申请国家发明专利62件,授权国家发明专利34件、国际专利4件,出版英文专著1部、中文专著3部。通过项目资助培养了一批优秀科学家,1人当选中国工程院院士,7人获国家级人才称号,12人次获部省级人才称号与荣誉。木材多维弱相结构失效及增强机制、木材弱相结构的木材可视化数据库、木材纤维稳态界面胶合重组新方法、木材纤维微尺度定向修饰与仿生功能化、木材主要组分化学结构特性解析与定向转化机制等系列新理论、新方法的发现和突破,增进了对木材细胞壁结构、木材纤维表界面化学和木材成分及其功能的新

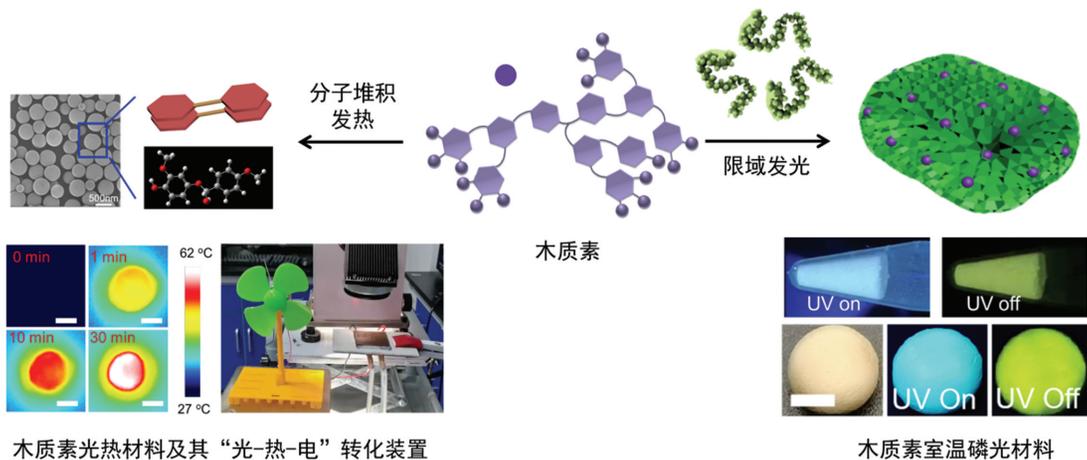


图7 木质素室温磷光材料

认知,推动了木质先进功能新材料等战略新兴产业发展,相关研究成果获国家科技进步奖二等奖、何梁何利基金科学与技术进步奖、教育部自然科学奖一等奖等奖励。项目实施结合国家双碳目标与绿色发展等重大战略需求,显著增强了我国林业工程领域的基础研究水平和国际影响力,提升了我国林业工程学科解决经济主战场实际问题的科技能力。

### 3.2 未来发展建议

作为地球上唯一可大规模再生的有机碳源,木材等林业生物质在全球 CO<sub>2</sub> 减排,加快碳中和目标实现将起到举足轻重的作用。当前,全球新一轮科技革命和产业变革正在孕育兴起,生物工程、绿色催化、新材料等新兴技术不断迭代,并与木材资源高效利用技术交叉融合,超分辨成像、高功率核磁、材料构象表征等新的表征技术将为木材结构解译、新产品定向转化带来新的突破,从而更好地促进林业工程学科的发展,实现资源更高效地利用。因此,我国科学家应立足国家双碳战略需求,面向木材科学领域国际前沿,围绕林木资源结构重组与定向调控机制这一核心科学问题,力争在木材天然结构解译与重组、主要化学组分定向转化、功能化调控机制等方面取得重大突破。重点关注:

(1) 木材细胞壁组分分布规律与材性关联机制、木材单元重组与复合机制等核心理论与方法研究,揭示木材组织构造内的介质能量迁移及互作规律,创新木材提质与功能化改良的理论与方法。

(2) 基于木材细胞壁结构成分复杂性和差异性,揭示木材纤维微纳结构与化学特性差异性及其演变规律、复合材料界面性能与融合规律等,为木材纤维高效利用及新兴产业培育提供理论基础。

(3) 在纤维素、木质素等木材主要组分功能化修饰及重构方面加强多学科交叉研究,在分子及超分子层面深度解析和发掘木材大分子理化特性如光学性能、力学性能和光热转化性能等,进而构建木材主要组分定向修饰与功能重组新方法体系,指导木材大分子高值化、功能化利用。

(4) 聚焦木材解聚后小分子的重构领域,构建定向解聚木质纤维素的化学和生物化学体系,实现重构小分子化学品路径的精准选择,通过新型催化体系的建立,实现过渡态中间体与自由基转化路径的精准控制,研发多功能复合材料如光学材料、电传感材料等。

高效利用结构调控与定向重组机制”总结报告和成果报告等整理而成,受篇幅所限,仅提到部分受项目支持的成果,敬请谅解。感谢储富祥研究员、吴义强教授、傅峰研究员和刘守新教授对本文的修改,同时对该项目学术领导小组各位专家、所有承担单位以及科研与管理人员表示一并感谢!

### 参 考 文 献

- [1] Wang D, Lin LY, Fu F. Deformation mechanisms of wood cell walls under tensile loading: a comparative study of compression wood (CW) and normal wood (NW). *Cellulose*, 2020, 27(8): 4161—4172.
- [2] Zhong Y, Wu GF, Fu F, et al. A novel constitutive model for the porosity related super-large deformation and anisotropic behavior of wood under perpendicular to grain compression. *Wood Science and Technology*, 2022, 56(2): 553—571.
- [3] Gao YF, Fu ZY, Fu F, et al. The formation mechanism of microcracks and fracture morphology of wood during drying. *Drying Technology*, 2023, 41(8): 1268—1277.
- [4] Zhu Y, Plaza N, Kojima Y, et al. Nanostructural analysis of enzymatic and non-enzymatic brown rot fungal deconstruction of the lignocellulose cell wall. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11: 1389.
- [5] Guo D, Yang S, Fu F, et al. New strategy for the preparation of ultra-high-strength wood-epoxy polymer composites. *Composites Communications*, 2022: 101191.
- [6] Yang S, Guo DK, Fu F, et al. A novel strategy accomplished by cell wall annular thickening with polymer for improving the mechanical performances of plantation wood. *Composites Communications*, 2023, 42: 101651.
- [7] Xu HS, Zhu Y, Li W, et al. Novel and green system for protecting wood against *Gloeophyllum trabeum* by combining biodegradable isothiazolinone with nontoxic chelators. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2022, 10(50): 16853—16861.
- [8] Ma LY, Meng QL, Jiang XM, et al. Spatial organization and connectivity of wood rays in *Pinus massoniana* xylem based on high-resolution  $\mu$ CT-assisted network analysis. *Planta*, 2023, 258(2): 28.
- [9] Zou XX, Liang L, Shen KZ, et al. Alkali synergetic two-step mechanical refining pretreatment of pondcypress for the fiber with intact 3D structure and ultrahigh cellulose accessibility fabrication. *Industrial Crops and Products*, 2021, 170: 113741.

致谢 本文根据国家自然科学基金重大项目“木材

- [10] Huang YX, Lin QQ, Yu YL, et al. Functionalization of wood fibers based on immobilization of tannic acid and *in situ* complexation of Fe (II) ions. *Applied Surface Science*, 2020, 510: 145436.
- [11] Zhang YY, Chen Y, Li GY, et al. High-performance lignocellulosic self-bonding composites via dialdehyde modification and water-involved low-temperature hot pressing. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2022, 10(47): 15538—15549.
- [12] Zhao B, Zeng WJ, Zhang WX, et al. Tailored bimetallic synergy of iron-cobalt sulfide anchored to S-doped carbonized wood fiber for high-efficiency oxygen evolution reaction. *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, 2024, 350: 123947.
- [13] Tian WY, Wan CC, Yong KT, et al. Learning from nature: constructing a smart bionic structure for high-performance glucose sensing in human serums. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(1): 2106958.
- [14] Chen YY, Wu Y, Li L, et al. Polysulfides manipulation: constructing g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> networks encapsulated into natural wood fibers for high-performance lithium-sulfur batteries. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 461: 141988
- [15] Lu CW, Wang CP, Yu J, et al. Two-step 3 D-printing approach toward sustainable, repairable, fluorescent shape-memory thermosets derived from cellulose and rosin. *ChemSusChem*, 2020, 13(5): 893—902.
- [16] Wang SH, Yu L, Wang SS, et al. Strong, tough, ionic conductive, and freezing-tolerant all-natural hydrogel enabled by cellulose-bentonite coordination interactions. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3408.
- [17] Chen L, Wang SH, Wang SS, et al. Scalable production of biodegradable, recyclable, sustainable cellulose-mineral foams via coordination interaction assisted ambient drying. *ACS Nano*, 2022, 16(10): 16414—16425.
- [18] Yin Y, Ma CH, Li W, et al. Rapid conversion of glucose to 5-hydroxymethylfurfural using a MoCl<sub>3</sub> catalyst in an ionic liquid with microwave irradiation. *Industrial Crops and Products*, 2021, 160: 113091.
- [19] Yin Y, Ma CH, Li W, et al. Insights into shape selectivity and acidity control in NiO-loaded mesoporous SBA-15 nanoreactors for catalytic conversion of cellulose to 5-hydroxymethylfurfural. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2022, 10(51): 17081—17093.
- [20] Yin Y, Qi YB, Ma CH, et al. Efficient conversion of cellulose to 5-hydroxymethylfurfural using a bifunctional hydrophobic SBA-15 catalyst: the effects of hydrophobicity, morphology and acidity. *Fuel Processing Technology*, 2023, 245: 107752.
- [21] Li W, Xu MC, Ma CH, et al. Tunable upconverted circularly polarized luminescence in cellulose nanocrystal based chiral photonic films. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(26): 23512—23519.
- [22] Xu MC, Ma CH, Zhou J, et al. Assembling semiconductor quantum dots in hierarchical photonic cellulose nanocrystal films: circularly polarized luminescent nanomaterials as optical coding labels. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(44): 13794—13802.
- [23] Xu MC, Wu XY, Yang Y, et al. Designing hybrid chiral photonic films with circularly polarized room-temperature phosphorescence. *ACS Nano*, 2020, 14(9): 11130—11139.
- [24] Xu MC, Li GY, Li W, et al. Exploring the circular polarization capacity from chiral cellulose nanocrystal films for a photo-controlled chiral *Helix* of supramolecular polymers. *Angewandte Chemie International Edition*, 2022, 61(18): e202117042.
- [25] An B, Xu MC, Sun JM, et al. Cellulose nanocrystals-based bio-composite optical materials for reversible colorimetric responsive films and coatings. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 233: 123600.
- [26] Li W, Chen ZJ, Yu HP, et al. Wood-derived carbon materials and light-emitting materials. *Advanced Materials*, 2021, 33(28): 2000596.
- [27] Zhao XP, Shi L, Tian B, et al. Harnessing solar energy for electrocatalytic biorefinery using lignin-derived photothermal materials. *Journal of Materials Chemistry A*, 2023, 11(23): 12308—12314.
- [28] Yuan JW, Zhai YX, Wan KL, et al. Sustainable afterglow materials from lignin inspired by wood phosphorescence. *Cell Reports Physical Science*, 2021, 2(9): 100542.
- [29] Cao MN, Liu F, Huo XZ, et al. Producing naturally degradable room-temperature phosphorescent materials by covalently attaching lignin to natural polymers. *Cell Reports Physical Science*, 2024, 5(2): 101811.
- [30] Yin WM, Dang B, Miao YY, et al. Producing sustainable room temperature phosphorescent materials using natural wood and sucrose. *Cell Reports Physical Science*, 2024, 5(2): 101792.
- [31] Wan KL, Tian B, Zhai YX, et al. Structural materials with afterglow room temperature phosphorescence activated by lignin oxidation. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 5508.
- [32] Zhai YX, Li SJ, Li J, et al. Room temperature phosphorescence from natural wood activated by external chloride anion treatment. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 2614.

- [33] Cao MN, Ren YR, Wu Y, et al. Biobased and biodegradable films exhibiting circularly polarized room temperature phosphorescence. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 2375.
- [34] Guo HD, Cao MN, Liu RX, et al. Photocured room temperature phosphorescent materials from lignosulfonate. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 1590.
- [35] Luo XF, Tian B, Zhai YX, et al. Room-temperature phosphorescent materials derived from natural resources. *Nature Reviews Chemistry*, 2023, 7(11): 800–812.

## Overview of the Achievements of Major Program on “Structural Regulation and Directional Restructuring Mechanism for Efficient Utilization of Wood”

Guiling Zhao\*

*Department of Life Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085*

**Abstract** The major program of the National Natural Science Foundation “Structural regulation and directional restructuring mechanism for efficient utilization of wood” was initiated in January 2019 and completed in December 2023. This work summarizes the significant research progress which achieved over the five-year duration of the major project. It includes the theory of weak-phase structures in wood, the failure and enhancement regulation mechanisms of multi-dimensional weak-phase structures of wood in fast-growing plantation timber. Furthermore, the project develops a strategy for directional softening of wood cell walls and a new mechanism for dissociation of the secondary wall  $S_1/S_2$  layer, deepening the fundamental understanding of precise dissociation and controllable functional recombination at the level of wood fiber. The article reveals the directional conversion of wood constituents and their aggregated state structures and develops a series of new wood-based functional materials for application in areas such as 3D printing, chiral optics, and phosphorescent anti-counterfeiting. The guidance and suggestions for the efficient utilization of wood are provided, including the interpretation and reconfiguration of natural wood structures, the directional transformation of main wood components, and functional regulation mechanisms.

**Keywords** major program; plantation wood; structural regulation; directional restructuring

(责任编辑 刘敏 张强)

\* Corresponding Author, Email: zhaogl@nsfc.gov.cn