

木质素在染料敏化太阳能电池中的应用研究进展

程洪清 胡冬英*

广西大学 南宁 530004

DOI:10.32629/ems.v8i3.19074

[摘要] 木质素作为一种储量丰富且可再生的芳香族聚合物,在绿色能源领域具有重要潜力。本文综述了其在染料敏化太阳能电池关键组件中的应用进展,重点围绕木质素“结构-功能”定向转化的三种路径展开。在对电极中,木质素衍生碳材料可通过多元素掺杂与孔结构调控替代昂贵的铂催化剂,并拓展至柔性及双面器件。在光阳极中,木质素作为绿色模板剂能够调控 TiO₂ 薄膜微观结构,从而增强光捕获与电子传输,提升器件长期稳定性。在电解质中,木质素通过构建交联网络或与导电聚合物复合,为开发稳定、防泄漏的准固态体系提供了可持续路径。文章进一步分析了木质素在 DSSC 应用中面临的机理解、性能均衡及器件集成等挑战,并对多学科交叉推动其实用化的方向进行了展望,以期期为发展高性能、低成本、全生物基的绿色光伏技术提供参考。

[关键词] 木质素; DSSC; 光阳极; 对电极; 电解质

1 引言

我国“双碳”目标是推动绿色发展、保障能源安全的重大战略。在能源领域,这一战略正驱动能源结构向清洁低碳加速转型,以减少对化石能源的依赖,并催生了绿色投资需求,促进了以风电、光伏为代表的非化石能源技术快速发展。在光伏领域,技术迭代已进入以新材料、新结构为特征的第三

代,主要包括染料敏化、钙钛矿及有机太阳能电池等(图1)。其中,染料敏化太阳能电池(DSSC)因其制备相对简单、原料来源广泛,且在弱光下仍具有良好的光电响应性能而备受关注。这些特点使其在建筑光伏一体化、柔性电子及室内光能收集等领域展现出应用潜力,成为光伏技术多元化发展与能源结构转型的一条可行路径。

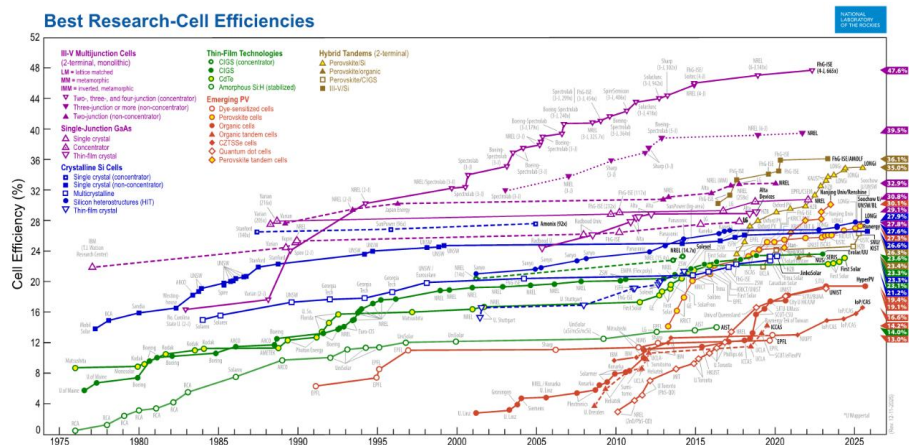


图1 NREL 官方最新发布的《Best Research-Cell Efficiency Chart》(最佳研究电池效率数据)^[1]

DSSC 自 1991 年由 O' Regan 和 Grätzel 取得突破以来,已成为第三代光伏电池的重要分支^[2,3]。其工作原理模拟光合作用,涉及光阳极、染料、电解质和对电极四个部分的协同作用:光阳极上的染料吸光后产生电子,注入 TiO₂ 导带并经外电路传输至对电极^[4];对电极催化电解质中的氧化还原电对(如 I₃⁻)还原^[5];同时氧化染料被电解质中的还原组分(如 I⁻)再生,从而完成光电循环^[6]。

然而,DSSC 的产业化仍面临多重挑战:传统 TiO₂ 薄膜的

比表面积和光散射能力有限,影响染料吸附和光捕获效率^[7];常用的铂对电极成本高昂^[8];液态电解质易挥发、易泄漏,热稳定性差且封装困难^[3,9]。因此,开发低成本、高稳定性并能优化各组件性能的新材料,成为推动 DSSC 发展的关键。

值得注意的是,解决这些问题的思路可能源于自然本身。木质素作为自然界储量最丰富的芳香族聚合物,是造纸工业的主要副产物,年产量巨大但多数仅被焚烧处理,未能实现高值化利用。其复杂的三维网状结构和丰富官能团,赋予了

它成为功能材料的潜力。例如，碱木质素或工业木质素可通过碳化转化为多孔碳材料，用于制备对电极^[10-12]。也可作为绿色模板剂，与 TiO₂ 前驱体复合构筑多级孔道结构，用于优化光阳极^[13]。这些研究不仅提升了木质素的利用价值，也为 DSSC 带来了传统材料不具备的新特性，如良好的界面相容性与环境友好性。

尽管已有研究探索木质素在 DSSC 各组件中的应用，但目前仍缺乏从器件整体出发的系统性综述。本文旨在填补这一空白，重点阐明木质素在不同部件中的功能化途径、作用机理及组件间的相互影响。我们认为，木质素在 DSSC 中的应用核心在于基于其本征结构进行“功能创造”，而非简单替代。因此，本文将围绕“木质素结构特性—功能化改性—DSSC 性能提升”这一主线，依次剖析其在光阳极、对电极和电解质中的创新应用，阐述如何通过精准转化将其特性赋能于 DSSC 的绿色发展。

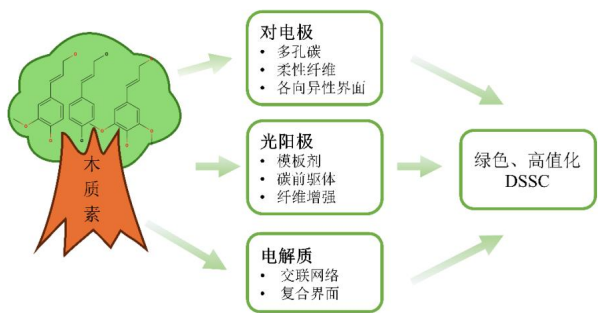


图 2 木质素在染料敏化太阳能电池中的应用

文中将通过对比分析，评估木质素基材料与传统材料的优劣及适用场景，并探讨尚未深入研究的领域，如光阳极中木质素模板的精确调控、组件间界面相容性等(图 2)。最后，本文展望未来研究方向，探讨通过多学科交叉推动木质素在

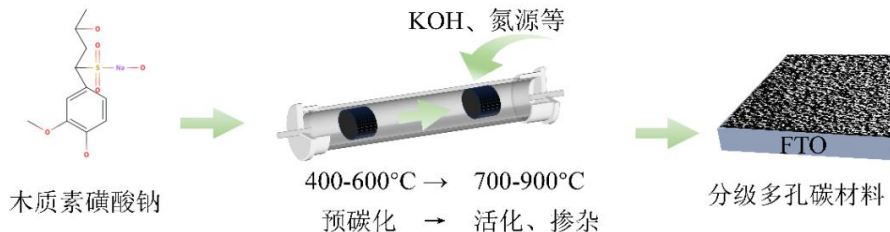


图 3 对电极转化机理图

木质素从“工业废料”转化为“高性能催化材料”的核心在于：通过杂原子掺杂优化其电子结构，并构建分级孔道以提升传质效率。相较于石墨烯等材料，木质素衍生碳材料的优势在于成本低廉和资源可持续。但其本征电导率通常较低，性能提升高度依赖于精准的掺杂策略与孔结构设计。此

DSSC 中实现更高层次应用的可行路径。

2 木质素在对电极中的基础转化与性能逻辑

在“双碳”目标与企业降本需求的双重驱动下，发展绿色、低成本的对电极成为推动 DSSC 产业化的关键之一。对电极在 DSSC 中的核心功能是收集电子并催化电解质的还原反应，因此理想材料需具备高导电性、高催化活性和稳定性。铂虽性能优异，但其高昂成本与资源稀缺性制约了 DSSC 的商业化应用。因此，开发低成本、高性能的替代材料至关重要。木质素作为一种碳含量高、来源丰富的天然高分子，经合理转化后，显示出作为对电极前驱体的良好潜力。下文将从多元素掺杂、新型结构设计及废料高值化三个方面，分析其在对电极中的功能化途径。

2.1 多元素掺杂与孔结构调控

以工业副产物木质素磺酸钠(SL)为原料，可通过预碳化和 KOH 活化制备多元素掺杂的分级多孔碳材料。该方法的关键在于：木质素磺酸钠本身含有氧和硫杂原子，通过引入尿素或硫脲等氮源，可实现氧-氮-硫(ONS)或氮-硫(NS)共掺杂(图 3)。这种掺杂能调节碳材料的电子结构，提供丰富的催化活性位点。同时，KOH 活化可刻蚀出包含微孔、中孔和大孔的分级孔道，这显著增加了比表面积，暴露了更多活性位点，并为电解质浸润和离子扩散提供了高效通道^[10]。该方法制备的 ONS 共掺杂碳材料比表面积可达 2252.15 m²/g，以其作为对电极的 DSSC 获得了 8.89% 的光电转换效率，优于铂电极(8.14%)^[10]。Li 等^[14]通过调控硫脲比例合成了 N、S 共掺杂碳材料，PCE 达 8.62% (铂电极为 7.98%)，且表现出更优的长期稳定性，表明共掺杂具有协同催化效应。

外，木质素来源的复杂性可能导致材料性能存在批次差异，这需要通过前驱体纯化与工艺标准化来进行控制。

2.2 新型结构与功能拓展

柔性电极的构建是 DSSC 未来的重要发展方向，其核心优势在于能够在保持较高光电转换效率(PCE)的同时，赋予器

件良好的可弯曲性和轻便性。木质素是构建此类柔性电极的理想前驱体。研究表明,通过静电纺丝技术可将碱木质素转化为碳纳米纤维垫,其比表面积高、柔韧性好,所得电池效率(7.60%)与铂电极相当,展现出良好的成本效益^[12]。更进一步,木质素还能用于调控导电聚合物的微观结构。以木质素磺酸钠作为诱导剂,可在电沉积过程中引导 PEDOT 分子有

序排列,从而制备出高性能的 SL/PEDOT 复合电极。该电极在双面 DSSC 中表现突出:单面光照下效率达 9.49%,双面光照下可达 16.13%^[11],并通过分子动力学模拟进行了进一步的分析(图 4)。该研究通过木质素实现了聚合物结构的精准调控,为设计绿色、高效的柔性电极提供了新思路。

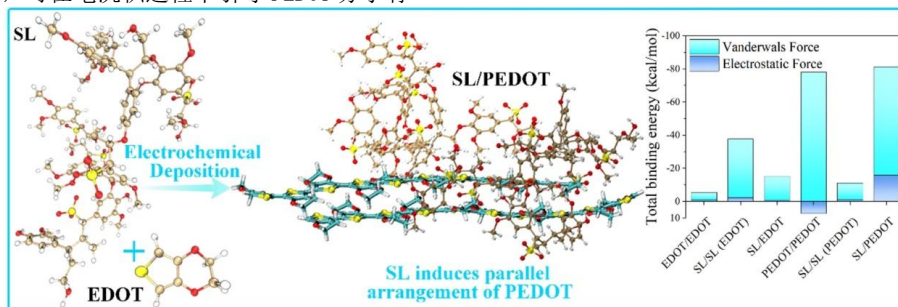


图 4 木质素磺酸钠诱导 PEDOT 分子取向的分子动力学模拟分析^[14]

2.3 废料高值化路径

将有害废料转化为高值材料是木质素应用的突出优势。例如,Cheng 等^[15]从造纸黑液中回收木质素,通过低温预氧化-高温自活化制备 O、N、S 共掺杂碳微球。预氧化形成的酯键增强了链的交联程度,无机杂质蚀刻形成多级微孔,并通过密度泛函理论计算证实此次掺杂能有效提升电解质吸附与界面的电子转移,最终 DSSC 的 PCE 达 9.22%。该路径同时

实现了废弃物资源化与材料功能化,符合循环经济理念。

上述研究案例表明,木质素基碳材料在对电极中展现出替代 Pt 的潜力。表 1 所示,通过多元素掺杂和孔结构调控,木质素衍生碳材料的 PCE 可达 8.89%,优于 Pt 电极(8.14%)。同时,其高比表面积和柔性设计增强了催化活性和适用性。然而,表中也揭示了稳定性数据的缺失,凸显了未来需系统评估耐久性。

表 1 木质素基碳材料与传统 Pt 对电极性能对比表

作者	前驱体	PCE (%)	比表面积 (m ² /g)	稳定性	柔性	对比 Pt (%)
Ling ^[13]	木质素磺酸钠	8.89	2252.15	7 天,保持约 97.5%初始效率	否	优于
Zhao ^[15]	碱木质素	7.60	941	未明确长期数据	是	接近
Liu ^[14]	木质素磺酸钠	9.49	不适用	500 小时,保持>90%效率	否	优于
Cheng ^[19]	工业废木质素	9.22	626.46	7 天,保持 97.5%初始效率	否	优于

2.4 研究挑战与未来展望

当前木质素基对电极研究仍面临若干瓶颈。其一,对材料构效关系的微观机制理解不足,如多元素掺杂体系中活性位点的形成与协同作用尚不明确。其二,木质素原料的天然异质性导致碳化产物性能存在批次差异,实现结构可控制备与工艺标准化是关键挑战。其三,现有评估多关注初始效率,缺乏长期运行环境下材料结构与性能衰减的系统研究。

面积、适宜孔隙率)和界面特性直接决定了染料吸附量与光生电子的注入/传输效率。传统 TiO₂光阳极在追求高比表面积的同时,往往面临颗粒易团聚、电解质渗透与界面电荷复合等问题。近年来,利用木质素这一天然高分子对光阳极进行改性,因其绿色、低成本及多功能的特性,形成了较为明确的研究路径,实现了从废弃物到功能材料的有效转化。

3.1 作为天然模板与掺杂剂

未来需推动研究范式从“性能导向”向“机理-工艺-应用协同”转变。应结合原位表征与理论计算深入揭示材料的作用机制,同时建立从原料到工艺的标准化流程,并构建更贴近真实应用场景的耐久性测试体系,从而为产业化奠定基础。

木质素凭借其空间位阻效应和成膜性,可作为绿色模板剂调控 TiO₂光阳极的微观结构。其作用机理在于:木质素分子吸附在 TiO₂纳米颗粒表面,能有效抑制其在烧结过程中的团聚;随后木质素在热处理中被移除,从而在薄膜中原位形成丰富的多级孔结构。这不仅能显著增加薄膜的比表面积以吸附更多染料,还利于电解质渗透和增强光散射。研究证实,

3 木质素在光阳极中的功能化应用:从天然模板到界面增强
光阳极作为 DSSC 光电转换核心,其微观结构(如高比表

使用稻壳木质素作为掺杂剂, 在优化浓度下可使器件获得与基准性能相近的光电转换效率, 并显著提升长期稳定性^[13, 16]。另一项研究采用从麦草提取的碱木质素, 通过“微观结构均质化”策略(图 5), 成功使 TiO₂ 的比表面积大幅增加, 染

料负载量提升, 最终基于此光阳极的 DSSC 获得了 8.83% 的效率, 并且在 240 小时后仍能保持 90% 以上的初始效率, 证明了木质素在改善光捕获、电荷传输和器件稳定性方面的双重功效^[17]。

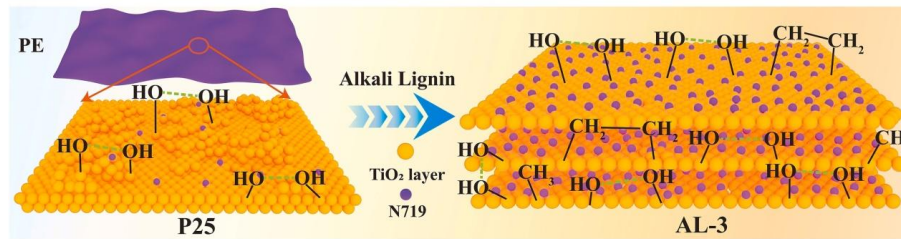


图 5 碱木质素驱动的 P25 光阳极微观结构均质化

3.2 作为碳前驱体构建复合导电骨架

木质素作为富碳前驱体, 在热处理过程中可能转化为导电碳相, 从而在 TiO₂ 光阳极中构建复合导电骨架。理论上, 这样形成的碳层可发挥多重作用: 抑制电子-电解质复合以提升开路电压; 在 TiO₂ 颗粒间建立额外导电通道, 改善电子传输; 其携带的杂原子(如 O、N、S)还可微调界面能级。然而, 这一机理的明确验证有赖于对碳层形成、分布及电学性质的精确表征。目前, 多数类似 Rabelsa 等人^[13]虽观察到性能提升, 但未能清晰区分其贡献究竟源于木质素的形态模板作用, 还是碳化产物的导电贡献。因此, 明确木质素在最终材料中的化学状态(残留聚合物、部分碳化或完全石墨化)对于理解其真实作用机制至关重要, 未来需借助原位分析技术深入探究。此技术路径的挑战在于, 碳层的厚度与分布难以精确控制: 过厚会阻碍染料吸附, 过薄或不均则无法形成有效的导电网络。

3.3 作为纤维组分增强界面结合与电荷收集

木质素作为天然纤维的主要组分, 可用于构建复合纤维体系, 以增强光阳极的机械强度和界面结合力。这一思路体现了将天然材料的增强特性应用于光电器件的界面工程。Premkumar 等^[18]利用菠萝冠叶提取的木质纤维素纤维改性 TiO₂ 光阳极。纤维表面的丰富官能团能与 TiO₂ 形成氢键锚定作用, 这不仅提升了薄膜的力学完整性、减少裂纹, 还可能为电子传输提供辅助路径。不同来源的木质素前驱体对器件性能影响显著(表 2)。例如, Liu 等^[17]使用麦草木质素制备的光阳极获得了 8.83% 的 PCE (Jsc 达 23.54 mA/cm²)。Rabelsa 等^[13, 16]采用稻壳木质素在较大面积电池中也展现出良好的应用潜力。而 Premkumar 等^[18]基于菠萝冠叶纤维的器件, 其 PCE 相对较低。这些对比表明, 木质素基材料的最终光电性能高度依赖于其前驱体的化学组成、结构形态以及所适配的电池工艺。

表 2 木质素基材料改性的光阳极性能数据对比

作者	前驱体	PCE (%)	比表面积 (m ² /g)	电池面积 (cm ²)	Jsc (mA/cm ²)	Voc (V)	FF
Liu ^[17]	麦草	8.83	879.55	0.25	23.54	0.70	55.58
Rabelsa ^[13, 16]	稻壳	4.81	无数据	1.5	12.56	0.669	57.3
Premkumar ^[18]	菠萝冠叶	1.0034	无数据	2.25	3.4906	0.7058	0.40644

3.4 研究挑战与未来展望

木质素在光阳极中的应用仍处于初步探索阶段, 机理认识尚不深入。多数研究未能明确热处理后木质素的化学形态及其对电荷动力学的具体影响。同时, 木质素自身性质差异与光阳极性能之间的构效关系缺乏系统研究, 导致材料设计可预测性差。此外, 长期稳定性评估不足, 尤其在模拟实际环境应力下的性能衰减机制研究匮乏。

未来应重点利用原位表征与理论模拟揭示木质素在复合材料中的作用本质。需通过化学修饰定向调控其界面特性,

并系统研究不同来源木质素的影响规律。此外, 必须建立统一的加速老化测试标准, 评估其在集成器件中的实际可靠性。

4 木质素在电解质体系中的基础转化与功能创新

电解质是 DSSC 中连接光阳极与对电极的离子传导桥梁, 其核心功能是再生氧化态染料并催化对电极界面的还原反应。理想的电解质需具备高离子电导率、良好的热稳定性和长期密封性。然而, 传统液态电解质因易挥发、易泄漏, 严重影响了 DSSC 的长期稳定性。开发准固态或固态电解质是解决该问题的关键方向。木质素凭借其丰富的官能团、可交联

的刚性芳香骨架以及良好的成膜性, 为构建可持续的电解质体系提供了独特的材料基础^[19]。当前研究主要围绕其两大核心功能展开, 也就是作为力学稳定的交联网络基体和作为调控界面电荷行为的复合功能相。

4.1 作为交联网络基体

将木质素作为交联剂与柔性聚合物结合, 是发展准固态电解质的有效策略。木质素的刚性结构可提供力学支撑、防止泄漏, 其极性官能团能与电解质相互作用, 而柔性链段则利于离子迁移。研究表明, 通过调节木质素与聚乙二醇的交联比例, 可以改善材料的柔韧性和对液态电解质的容纳能力^[20]。基于此制备的水性 DSSC 效率可达 1.54%, 并在加速老化测试中表现出优异的稳定性 (性能衰减 < 5%), 这得益于木质素本身的紫外吸收和自由基清除能力。此类生物基电解质体系优势在于环境相容性、可持续性 & 长期稳定性。然而, 其发展仍需关注离子电导率与三维网络结构间的平衡, 避免过度交联导致离子传输受阻; 同时, 材料的力学性能也需分子

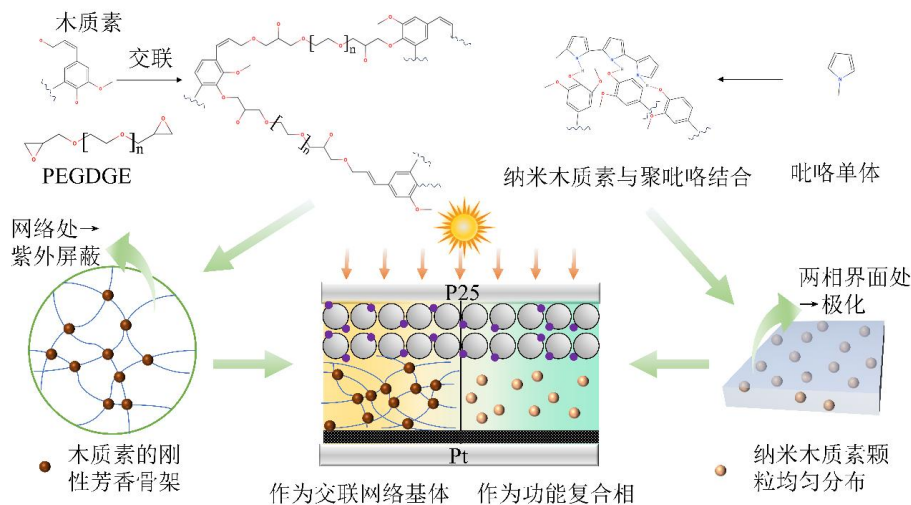


图 6 电解质功能路径对比图

如图 6 所示, 两种路径揭示了不同的性能权衡。De Haro^[20]的木质素交联膜以适中的电导率 ($\sim 10^{-4}$ S/cm) 和良好的封装稳定性为核心优势, 为实现长寿命 DSSC 提供了可靠方案; 而 Eladgham^[25] PPy/NL 复合材料则展示了通过牺牲体相电导率 (可低至 10^{-8} S/cm 量级)、利用界面极化效应来优化器件功能的创新思路。两者共同凸显了木质素在电解质设计中 “结构稳定” 与 “界面功能化” 两大潜在价值。

4.3 研究挑战与未来展望

木质素在电解质中的研究仍面临机理与性能平衡的双重挑战。离子在木质素基交联网络或复合界面中的传输机制尚

设计进行优化, 以兼顾柔韧性 & 机械强度。

4.2 作为功能复合相

将纳米木质素与导电聚合物复合, 为优化电解质性能提供了一种新思路。其核心在于利用纳米木质素的半导体特性及其与聚合物间的界面效应, 调控复合材料的电荷传输行为。研究表明, 随着 NL 含量的增加, 复合材料的直流电导率显著下降 (例如, NL 含量为 5% 时电导率约 10^{-5} S/cm, 增至 50% 时约 10^{-8} S/cm)^[21]。但同时会在两相界面处产生显著的界面极化现象。尽管电导率降低, 但含 50% NL 的复合材料在 DSSC 中作为电解质实现了 0.974% 的光电转换效率, 显著高于纯 NL 电解质的 0.224%。这表明, 纳米木质素不仅是填充物, 其界面相互作用能有效促进电荷分离并抑制复合。这项工作揭示了一种新的设计逻辑: 通过引入具有特定半导体性质的生物质来构建有利的界面结构, 可以在不过度追求高电导率的情况下, 通过优化电荷行为来提升整体器件性能, 关键在于平衡电导率损失与界面极化带来的增益。

不明确, 且其化学非均质性对电导率的影响缺乏系统认知。材料设计往往难以兼顾机械稳定性、高离子电导与界面功能化, 性能提升存在明显权衡。

今后应深入揭示木质素结构与离子传输行为的构效关系, 指导材料理性设计。发展可控制备技术以实现多尺度结构调控, 并加强木质素基电解质与其他生物基组件的界面相容性研究。建立标准化的耐久性测试方法, 系统评估其在多应力条件下的长期性能。

总结与展望

木质素在 DSSC 各组件中的应用均体现了 “结构赋能功

能”的核心逻辑。通过定向转化,其在对电极中实现高效催化,在光阳极中优化薄膜结构,在电解质中构建稳定体系,展现了从废弃物向功能材料转型的潜力。

然而,构建全生物基 DSSC 仍存在系统性挑战:各组件间的界面协同机制不清,缺乏统一的耐久性评估标准,且原料差异与规模化制备工艺亟待解决。

未来研究需实现三大转向:从现象观察到机理引导的理性设计,从组件优化到系统集成创新,最终从实验室性能导向迈向产业化可行性评估。通过多学科交叉与全链条创新,木质素有望为发展绿色、可持续的光伏技术提供实质性支撑。

[参考文献]

- [1] (NREL), N. R. E. L., in Book Best Research-Cell Efficiency Chart, ed., ed. by Editor, National Renewable Energy Laboratory, City, 2025, Chap. Chapter.
- [2] Szindler, M.; Szindler, M.; Drygala, A.; Lukaszkwicz, K.; Kaim, P.; Pietruszka, R. *Materials*. 2021, 14.
- [3] Desilvestro, J.; Graetzel, M.; Kavan, L.; Moser, J.; Augustynski, J. *Journal of the American Chemical Society*. 1985, 107, 2988-2990.
- [4] Vlachopoulos, N.; Grätzel, M.; Hagfeldt, A. *RSC Advances*. 2021.
- [5] Lee, C.-P.; Ho, K.-C. *European Polymer Journal*. 2018, 108, 420-428.
- [6] Kamaraj, S.; Shanmugam, G.; Selvaraj, B. *Energy Technology*. 2024, 13.
- [7] Chinnarani, M.; Prabu, K. M.; Suresh, S. *Results in Chemistry*. 2023, 5, 100835.
- [8] Venkatesan, S.; Hong, R.-Y.; Teng, H.; Lee, Y.-L. *Materials Today Energy*. 2025, 48, 101761.
- [9] Munir, M. T.; Naqvi, M.; Li, B.; Raza, R.; Khan, A.; Taqvi, S. A. A.; Nizami, A.-S. *Journal of Energy Storage*. 2024, 82, 110477.
- [10] Ling, Y.-K.; Li, J.-z.; Zhu, T.; Wang, J.-h.; Wang, Q.; Li, Y.-j.; Nong, G.-z. *Organic Electronics*. 2024, 127, 107015.
- [11] Liu, B.; Cheng, H.; Cheng, F.; Hu, D. *Chemical Engineering Journal*. 2025, 505, 159499.
- [12] Zhao, Y.; Liu, Y.; Tong, C.; Ru, J.; Geng, B.; Ma, Z.; Liu, H.; Wang, L. *Journal of Materials Science*. 2018, 53, 7637-7647.
- [13] Rabelsa, G.; Firdaus, Y.; Shobih; Hidayat, J.; Rijal, M. S.; Sova, R. R.; Yuliarto, B. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024, 2705.
- [14] Li, J.; Zhang, J.; Ling, Y.; Long, M.; Tian, R.; Liang, T.; Nong, G. *Journal of Applied Electrochemistry*. 2025, 55, 679-690.
- [15] Cheng, W.; Wan, C.; Li, X.; Chai, H.; Yang, Z.; Wei, S.; Su, J.; Tang, X.; Wu, Y. *Journal of Energy Chemistry*. 2023, 83, 549-563.
- [16] Rabelsa, G.; Shobih; Hidayat, J.; Milana, P.; Budiawan, W.; Almuqqodas, E.; Nursam, N. M.; Ibrahim, A.; Pranoto, L. M.; Firdaus, Y.; Yuliarto, B. *Heliyon*. 2025, 11, e39913.
- [17] Liu, B.; Shao, X.; Kang, Z.; Cheng, H.; Hu, D. *Journal of Power Sources*. 2025, 644, 237142.
- [18] Premkumar, N.; Madhavi, M. R.; Kitmo, K.; Shanmugan, S. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*. 2024, 13, 13-25.
- [19] Libretti, C.; Correa, L. S.; Meier, M. A. R. *Green Chemistry*. 2024, 26, 4358-4386.
- [20] de Haro, J. C.; Tatsi, E.; Fagiolari, L.; Bonomo, M.; Barolo, C.; Turri, S.; Bella, F.; Griffini, G. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2021, 9, 8550-8560.
- [21] Iadgham, E. H. A.; Abdel Rehim, M. H.; Turky, G. *RSC Advances*. 2025, 15, 29149-29159.

(通讯作者: 胡冬英)*Email: hdy@gxu.edu.cn

基金项目: 2026年广西林业科技推广示范项目: 桂林科研[2026KX]第29号。

广西大学自然科学与技术创新发展倍增计划项目(2024BZRC008)。