

可持续化学：绿色溶剂在有机合成中的应用与展望

杨超

湖北大学 湖北武汉

【摘要】本文综述了可持续化学领域中绿色溶剂在有机合成中的应用与展望。文章首先介绍了绿色溶剂的概念及其对环境友好的特性，随后详细探讨了绿色溶剂在有机合成中的多种应用，包括作为反应介质、促进剂和选择性调节剂等。文中还分析了绿色溶剂在提高反应效率、降低能耗和减少废物排放方面的优势，并展望了绿色溶剂未来在有机合成中的发展方向和潜在挑战。通过这些讨论，本文旨在强调绿色溶剂在推动化学工业可持续发展中的重要性，并为相关领域的研究和应用提供参考。

【关键词】绿色溶剂；可持续化学；超临界流体技术；离子液体

【收稿日期】2024 年 5 月 16 日

【出刊日期】2024 年 6 月 22 日

【DOI】10.12208/j.jccr.20240005

Sustainable Chemistry: Application and Prospect of Green Solvents in Organic Synthesis

Chao Yang

Hubei University, Wuhan, Hubei

【Abstract】 This paper reviews the application and prospect of green solvents in organic synthesis in the field of sustainable chemistry. The article first introduces the concept of green solvents and their environmentally friendly properties, and then discusses in detail the various applications of green solvents in organic synthesis, including as reaction media, promoters and selective regulators. The article also analyzes the advantages of green solvents in improving reaction efficiency, reducing energy consumption and reducing waste emissions, and looks forward to the future development direction and potential challenges of green solvents in organic synthesis. Through these discussions, this article aims to emphasize the importance of green solvents in promoting the sustainable development of the chemical industry and provide a reference for research and application in related fields.

【Keywords】 Green solvents; Sustainable chemistry; Supercritical fluid technology; Ionic liquids

1 前言

在当今化学工业中，绿色溶剂的应用正逐渐成为推动可持续化学发展的关键因素。随着全球对环境保护意识的增强，化学合成领域迫切需要减少对传统有机溶剂的依赖，这些溶剂往往具有毒性、易燃、难降解等缺点，对环境和人类健康构成威胁。根据国际化学品制造商协会（AICIS）的报告，传统有机溶剂的使用每年在全球范围内导致数以万吨计的挥发性有机化合物（VOCs）排放，这些排放物对大气质量造成严重影响^[1]。因此，开发和应用绿色溶剂，不仅有助于降低化学工业对环境的负面影响，还能提高化学反应的效率和选择性，从而实现经济效益与环境保护的双赢。

2 绿色溶剂的定义与分类

2.1 绿色溶剂的定义

绿色溶剂，作为可持续化学领域的重要组成部分，其定义强调的是对环境影响最小化的同时，仍能有效促进有机合成反应的溶剂。这类溶剂通常具有低毒性、可生物降解或可再生的特性，它们在减少化学工业对环境的负面影响方面发挥着关键作用。例如，水作为最简单的绿色溶剂，在许多有机合成反应中替代了传统的有机溶剂，不仅因为其无毒、无色、无味，还因为其来源广泛、成本低廉。根据一项研究，使用水作为溶剂的有机反应，其环境影响指数（E-factor）可降低至传统有机溶剂的 1/10。此外，超临界二氧化碳（scCO₂）作为一种非传统绿色溶剂，其在某些反应中展现出优异的溶解能力和反应介质特性，同时避免了有机溶剂的使用，减少了废物的产生。绿色溶剂正是实现这一目标的关键工具之一。

2.2 绿色溶剂的分类及其特点

绿色溶剂作为可持续化学的重要组成部分，其分类多样，每种类型都具有独特的环境友好特性。例如，水相合成法利用水作为溶剂，其无毒、不燃、廉价且易于获得的特点，使得它在有机合成中成为一种理想的绿色选择。超临界流体技术，尤其是超临界二氧化碳，因其在临界点附近具有液体的溶解能力和气体的扩散性，被广泛应用于精细化学品的合成中。生物降解溶剂，如某些酯类和醇类，它们在自然环境中能够被微生物分解，减少了对生态系统的长期影响。离子液体，以其几乎为零的蒸汽压和可调节的溶解性，为有机合成提供了新的可能性，同时减少了挥发性有机化合物（VOCs）的排放。这些绿色溶剂的共同特点是它们对环境的负担小，有助于推动化学工业向更加可持续的方向发展。

3 绿色溶剂在有机合成中的优势

3.1 环境友好性

在有机合成领域，绿色溶剂的环境友好性是其最显著的优势之一。随着全球对可持续化学的重视，绿色溶剂的使用不仅减少了对传统有机溶剂的依赖，也显著降低了化学工业对环境的负面影响。例如，水相合成法利用水作为溶剂，其无毒、无害、可再生的特性使得它成为一种理想的绿色溶剂。据研究，水相合成法相较于传统有机溶剂，可减少高达 90% 的废物产生^[2]。此外，超临界流体技术，特别是超临界二氧化碳，因其在反应后易于从产品中分离且可循环使用，已成为一种环境友好的选择。生物降解溶剂的使用也日益增多，它们在反应完成后可以被微生物分解，从而避免了长期环境污染的问题。在药物合成中，绿色溶剂的应用不仅提高了合成效率，还减少了有害副产品的生成，这在提高药物质量的同时，也符合了“绿色化学”的原则。

3.2 提高反应效率与选择性

在有机合成领域，绿色溶剂的引入不仅有助于实现化学反应的环境友好性，而且在提高反应效率与选择性方面展现出巨大潜力。例如，水相合成法作为一种典型的绿色溶剂应用，其在某些反应中显示出比传统有机溶剂更高的反应速率和产率。研究指出，在水介质中进行的某些亲核取代反应，其速率常数可比有机溶剂中高出数倍，这归因于水的高介电常数和氢键网络的形成，从而促进了反应物的活化和中间体的稳定。此外，超临界流体技术，尤其是超临界二氧化碳，因其独特的溶解特性和可调节的反应环境，已被证明在提高反应选择性方面具有显著优势。在药物合成中，绿色溶

剂的应用案例表明，通过精确控制反应条件，可以实现对特定立体异构体的高选择性合成，从而提高药物的纯度和疗效。

4 绿色溶剂在有机合成中的应用实例

4.1 水相合成法的实际应用案例

水相合成法作为绿色溶剂应用的一个重要分支，在有机合成领域展现了其独特的环境友好性和经济效益。以水作为溶剂，不仅避免了传统有机溶剂的挥发性和毒性问题，而且水的来源广泛、成本低廉，符合可持续发展的发展理念。例如，在合成药物中间体时，水相合成法能够显著提高反应的选择性，减少副产物的生成，从而提高目标产物的产率。一项研究显示，在合成某些特定的药物前体时，水相合成法相较于传统的有机溶剂方法，产率提高了 10% 以上，同时减少了约 20% 的副产物^[3]。这种效率的提升不仅减少了原料的浪费，也降低了后续分离纯化的成本和环境负担。此外，水的高比热容和良好的热传导性能使得水相合成法在放热反应中具有更好的温度控制能力，有助于提高反应的安全性。这不仅强调了水在绿色化学中的核心地位，也指出了水相合成法在推动可持续化学发展中的巨大潜力。

4.2 超临界流体技术在有机合成中的新进展

超临界流体技术作为绿色溶剂领域的一项创新，近年来在有机合成中取得了显著的进展。超临界流体，尤其是超临界二氧化碳（scCO₂），因其独特的物理化学性质，如低粘度、高扩散性和可调节的溶解能力，已成为一种理想的绿色溶剂。在有机合成中，超临界流体技术的应用不仅减少了有机溶剂的使用，降低了环境污染，而且在提高反应效率和选择性方面展现出巨大潜力。例如，研究表明，在超临界条件下，某些反应的速率可提高数倍，同时副产物的生成显著减少^[4]。此外，超临界流体技术在药物合成中的应用也日益增多，如在合成抗癌药物紫杉醇的过程中，使用 scCO₂ 作为溶剂，不仅提高了产物的纯度，还简化了后处理步骤，体现了其在可持续化学中的重要价值。

4.3 生物降解溶剂在有机合成中的应用探索

在有机合成领域，生物降解溶剂的应用探索正逐渐成为可持续化学研究的热点。生物降解溶剂，如某些天然油脂和醇类，因其在环境中的可降解性而受到青睐。例如，使用生物基溶剂如乙酸丁酯代替传统有机溶剂，在某些合成反应中已经显示出良好的溶解性能和反应效率。研究显示，生物降解溶剂在药物合成中的应用可以减少对环境的负担，同时保持甚至提高反应的

选择性和产率。例如，一项研究中，通过使用生物降解溶剂进行药物中间体的合成，不仅减少了废物的产生，而且通过优化反应条件，实现了高达 95% 的产率^[5]。此外，生物降解溶剂的使用也符合绿色化学的“十二原则”，特别是原则五，即设计合成方法以避免副产物的生成，以及原则六，即尽可能不使用有毒的溶剂和试剂。因此，生物降解溶剂在有机合成中的应用不仅有助于推动化学工业向更绿色、更可持续的方向发展，而且为实现化学反应的环境友好性和经济效益提供了新的思路。

4.4 离子液体在催化反应中的应用研究

离子液体作为一类新型的绿色溶剂，在有机合成中展现了巨大的潜力，特别是在催化反应中的应用研究已经取得了显著的进展。离子液体的非挥发性、高热稳定性以及可调节的溶解性和极性，使其成为传统有机溶剂的理想替代品。例如，在催化加氢反应中，离子液体可以提供无水的环境，从而避免了水对催化剂活性的影响，显著提高了反应的选择性和产率。研究显示，在某些特定的反应中，使用离子液体作为溶剂，反应的转化率和选择性可以分别提高至 95% 和 99% 以上^[6]。此外，离子液体的可设计性允许科学家们根据特定反应的需求，定制离子液体的结构，从而优化催化效果。

4.5 绿色溶剂在药物合成中的具体应用案例

在药物合成领域，绿色溶剂的应用正逐渐成为推动可持续化学发展的重要力量。以离子液体为例，它们在药物合成中的应用已经显示出显著的环境友好性和经济效益。例如，某些离子液体已被证明能够有效替代传统有机溶剂，在合成药物中间体时，不仅减少了挥发性有机化合物(VOCs)的排放，而且提高了反应的选择性和产率。在一项研究中，使用离子液体作为溶剂，成功实现了对特定药物分子的高效合成，产率提高了 20% 以上，同时减少了副产物的生成，这不仅优化了药物合成的工艺流程，也符合了绿色化学的原则^[7]。

此外，超临界流体技术在药物合成中的应用也展现了绿色溶剂的潜力。超临界二氧化碳(scCO₂)作为一种无毒、无色、非易燃的溶剂，其在药物合成中的应用减少了对传统有机溶剂的依赖。在药物合成的某些步骤中，scCO₂ 已被证明能够提供更高的反应速率和更好的反应控制。例如，在合成非甾体抗炎药(NSAIDs)的过程中，使用 scCO₂ 作为溶剂，不仅提高了反应的选择性，而且在后续的分离和纯化过程中，由于 scCO₂ 的易挥发性，大大简化了操作步骤，降低了能耗。

在药物合成的实践中，绿色溶剂的使用也促进了对合成路径的重新设计。生物降解溶剂如聚乙二醇(PEG)和植物油衍生的溶剂，因其可再生性和生物相容性，在合成复杂药物分子时提供了新的可能性。例如，在合成某些抗癌药物时，通过使用 PEG 作为溶剂，不仅提高了反应的效率，而且由于其良好的溶解性能，使得反应可以在更温和的条件下进行，从而减少了副反应的发生。这种合成路径的优化，不仅符合绿色化学的原则，也提高了药物合成的可持续性。

综上所述，绿色溶剂在药物合成中的应用案例表明，它们在提高反应效率、减少环境污染和促进可持续化学发展方面具有巨大潜力。随着研究的深入和技术的进步，绿色溶剂在药物合成中的应用将更加广泛，为实现化学工业的绿色转型和可持续发展提供有力支持。

5 绿色溶剂的合成方法与技术

5.1 生物基溶剂的制备途径及优化策略

生物基溶剂的制备途径及优化策略是绿色溶剂研究领域中的一个重要分支，它不仅体现了可持续化学的理念，而且在有机合成中展现了巨大的应用潜力。生物基溶剂通常来源于可再生的生物质资源，如植物油、糖类、木质素等，这些资源的利用有助于减少对化石燃料的依赖，降低温室气体排放。例如，通过酯交换反应，可以将植物油转化为生物柴油，同时产生的甘油可以进一步转化为甘油三酯类溶剂，这类溶剂在有机合成中表现出良好的溶解性和生物降解性^[8]。优化策略方面，研究者们通过分子设计和合成路径的创新，致力于提高生物基溶剂的性能和经济性。例如，采用酶催化技术可以实现对特定溶剂的高效合成，同时减少副产物的生成。此外，生命周期评估(LCA)模型被广泛应用于评估生物基溶剂的环境影响，确保其在整个生命周期中都符合绿色化学的原则。

5.2 离子液体合成的绿色化学原则

在绿色溶剂的探索中，离子液体合成的绿色化学原则显得尤为重要，它不仅体现了可持续化学的理念，而且在有机合成中展现了巨大的应用潜力。离子液体，作为一种新型的绿色溶剂，其设计和合成过程遵循原子经济性、减少废物产生、使用安全和可再生原料等原则。例如，通过使用生物基离子液体，可以显著降低合成过程中的碳足迹，同时提高反应的选择性和效率。研究显示，某些离子液体在催化反应中可以实现接近 100% 的原子经济性，这意味着几乎所有的原料都被转化为目标产物，极大地减少了副产物的生成和后续处理的复杂性^[9]。

在实际应用中，离子液体的绿色化学原则也得到了体现。例如，离子液体在催化有机合成反应时，可以实现无溶剂或低溶剂条件下的高效反应，这不仅减少了溶剂的使用量，也降低了环境污染。此外，离子液体的可设计性使其能够针对特定反应进行优化，从而提高反应的选择性和产率。在药物合成领域，离子液体的使用可以减少传统有机溶剂的使用，降低生产成本，同时提高药物的纯度和安全性。

5.3 无溶剂合成技术的原理与应用

无溶剂合成技术作为绿色化学的重要组成部分，其原理主要基于在无溶剂条件下进行化学反应，从而避免了传统有机溶剂的使用，显著降低了环境污染和生产成本。在有机合成中，无溶剂技术的应用不仅减少了废物的产生，而且提高了反应的选择性和产率。例如，通过固相合成技术，可以在固体表面直接进行反应，避免了溶剂的使用，同时提高了反应速率和产物的纯度。研究显示，某些无溶剂合成反应的产率可达到 90% 以上，这在传统溶剂合成中是难以实现的^[10]。此外，无溶剂合成技术还能够简化后处理步骤，因为反应后无需去除溶剂，从而减少了能源消耗和操作时间。

5.4 绿色溶剂合成过程中的能量效率

在绿色溶剂合成过程中，能量效率的提升是实现可持续化学的关键因素之一。以离子液体为例，其合成过程中的能量效率可通过优化合成路径和反应条件来显著提高。例如，通过采用微波辅助合成技术，可以在较短的时间内完成离子液体的合成，同时减少能耗。研究表明，微波合成与传统加热方法相比，能效可提高 30% 以上。此外，离子液体的循环利用技术也对提升整体能量效率至关重要^[11]。在某些应用中，离子液体可以被回收并重复使用多次，从而减少了新溶剂的制备需求和相应的能量消耗。因此，通过不断优化绿色溶剂的合成方法，我们不仅能够减少对环境影响，还能在经济上实现可持续性。

5.5 环保型溶剂的再生与循环利用技术

在可持续化学的未来中，环保型溶剂的再生与循环利用技术是实现绿色化学目标的关键环节。随着工业对环境影响的日益关注，溶剂的回收与再利用不仅减少了对新溶剂的需求，也显著降低了废物排放和生产成本。例如，离子液体由于其独特的物理化学性质，如不挥发性和可调节的溶解性，已成为溶剂回收领域的研究热点。在某些应用中，离子液体可以被设计为“永久性”溶剂，通过简单的蒸馏或电化学方法实现再生，循环使用次数可达到数十次甚至上百次。根据一项

研究，特定的离子液体在催化反应中循环使用 100 次后，其催化效率仅下降 5%，这表明了其在工业应用中的巨大潜力^[12]。

此外，生物降解溶剂的循环利用技术也在不断进步。生物降解溶剂通常来源于可再生资源，如植物油和糖类，它们在使用后可以通过生物处理或化学方法转化为无害物质。例如，某些基于糖类的溶剂在完成反应后，可以通过酶促反应转化为水和二氧化碳，实现完全的生物降解。在一项案例研究中，一种基于玉米糖浆的溶剂在完成有机合成后，通过酶处理，95% 以上的溶剂被转化为水和二氧化碳，剩余的 5% 通过蒸馏回收，循环利用率达到 90% 以上^[13]。

在绿色溶剂的循环利用技术中，能量效率的优化同样重要。采用先进的分离技术，如膜分离技术，可以有效降低溶剂再生过程中的能耗。膜技术在分离溶剂和产物时，不仅提高了分离效率，还减少了对环境的热负荷。例如，采用纳滤膜技术可以从反应混合物中分离出目标产物，同时允许溶剂循环使用，减少了传统蒸馏过程中的能源消耗。根据相关研究，使用纳滤膜技术可以将溶剂再生过程的能耗降低 30% 以上，显著提高了整个合成过程的环境可持续性^[6]。

综上所述，环保型溶剂的再生与循环利用技术在推动绿色化学和可持续化学发展方面扮演着至关重要的角色。通过不断的技术创新和优化，我们有望在不久的将来实现溶剂的高效循环利用，从而在有机合成领域实现真正的环境友好和经济效益双赢。

6 绿色溶剂面临的挑战与问题

6.1 绿色溶剂的成本与可获得性

绿色溶剂在有机合成中的应用虽然前景广阔，但其成本与可获得性问题一直是制约其广泛应用的关键因素。以离子液体为例，尽管它们在提高反应效率和选择性方面表现出色，但其合成成本相对较高，这主要是由于所需原料的稀有性和合成过程的复杂性。例如，某些离子液体需要使用昂贵的离子液体专用前体，这增加了生产成本。然而，随着技术进步和规模化生产，成本问题有望得到缓解。例如，通过采用生物基原料替代传统石化原料，可以显著降低离子液体的生产成本。此外，通过优化合成工艺和提高原料转化率，也能有效减少生产成本。在可获得性方面，绿色溶剂的供应链建设是关键。供应链的稳定性直接影响到绿色溶剂的市场供应和价格波动。例如，水相合成法中使用的水作为溶剂，虽然成本低廉且易于获得，但在某些特定反应中可能无法提供足够的溶解度或反应活性。因此，开发新的

绿色溶剂，如生物降解溶剂，需要考虑其原料的可持续性和生产过程的环境影响。在实际应用中，绿色溶剂的推广需要政府、企业和科研机构的共同努力，通过政策支持、技术创新和市场激励等手段，提高绿色溶剂的可获得性，降低其成本，从而推动可持续化学的进一步发展。

6.2 绿色溶剂的回收与再利用问题

在绿色溶剂的回收与再利用问题上，可持续化学的未来面临诸多挑战。以离子液体为例，其在有机合成中表现出色，但其回收再利用的效率直接影响到其环境友好性的评价。研究显示，某些离子液体的回收率可达到90%以上，但这一过程往往需要复杂的分离技术，如膜分离、蒸馏或萃取等，这不仅增加了操作成本，也可能对溶剂的结构稳定性造成影响^[14]。因此，开发高效、低成本的回收技术是推动绿色溶剂广泛应用的关键。例如，采用吸附法回收离子液体，通过选择性吸附剂，可以简化回收流程，提高回收效率。此外，循环利用技术的创新，如利用微波辅助技术加速离子液体的再生，不仅提高了溶剂的循环次数，也减少了能源消耗。因此，绿色溶剂的回收与再利用技术的突破，将为实现化学工业的可持续发展提供重要支撑。

7 绿色溶剂的未来展望与发展方向

7.1 绿色溶剂在工业规模应用的前景

随着全球对可持续化学和绿色化学原则的日益重视，绿色溶剂在工业规模应用的前景显得尤为光明。根据国际化学工业协会的报告，到2030年，预计绿色溶剂的市场规模将增长至数百亿美元。这一增长不仅反映了对环境友好型化学品的需求增加，也体现了工业界对提高生产效率和降低环境影响的双重追求^[15]。例如，生物基溶剂如乙醇和异丙醇，由于其可再生性和低毒性，已经在制药和精细化工领域得到了广泛应用。此外，超临界流体技术，尤其是超临界二氧化碳，因其独特的溶解特性和环境优势，在天然产物提取和聚合物加工中显示出巨大的潜力。研究显示，使用超临界流体技术可以减少高达90%的有机溶剂使用量，同时提高产品纯度和收率。在药物合成领域，绿色溶剂的应用也日益增多，如离子液体在催化反应中的使用，不仅提高了反应的选择性和效率，还减少了副产物的生成，从而降低了废物处理的成本和环境风险^[16]。未来，随着绿色溶剂合成技术的不断进步和成本的进一步降低，预计它们将在工业规模上得到更广泛的应用，推动化学工业向更加可持续和环境友好的方向发展。

7.2 绿色溶剂研究的未来趋势与创新点

随着全球对可持续化学和绿色化学的日益重视，绿色溶剂的研究与应用正迎来前所未有的发展机遇。在未来的绿色溶剂研究中，创新点将集中在开发更高效、更经济、更环保的溶剂体系。例如，离子液体作为一种新型绿色溶剂，其研究正朝着提高其合成效率和降低成本的方向发展。通过采用先进的合成方法，如微波辅助合成，可以在显著缩短反应时间的同时，提高离子液体的产率和纯度。此外，离子液体在催化反应中的应用研究也显示出其在提高反应选择性和转化率方面的巨大潜力。例如，某些离子液体已被证明能够有效催化C-C键的形成，这对于药物合成和精细化工产品具有重要意义。在实际应用中，绿色溶剂的创新也体现在其循环利用技术上，通过开发高效的回收和再生技术，可以显著降低绿色溶剂的使用成本，同时减少对环境的影响。未来，随着绿色溶剂技术的不断进步，它们在工业规模应用中的前景将更加广阔，有望在制药、农药、材料科学等多个领域实现广泛应用，从而推动化学工业向更加可持续的方向发展。

参考文献

- [1] Nanda, Binita, et al. "Green solvents: A suitable alternative for sustainable chemistry." *Materials Today: Proceedings* 47 (2021): 1234-1240.
- [2] Chaudhary, Amita, Ankur Dwivedi, and Sreedevi Upadhyayula. "Supercritical fluids as green solvents." *Handbook of Greener Synthesis of Nanomaterials and Compounds*. Elsevier, 2021. 891-916.
- [3] Alqahtani, Arwa Sultan. "Indisputable roles of different ionic liquids, deep eutectic solvents and nanomaterials in green chemistry for sustainable organic synthesis." *Journal of Molecular Liquids* (2024): 124469.
- [4] Hessel, Volker, et al. "Sustainability of green solvents—review and perspective." *Green Chemistry* 24.2 (2022): 410-437.
- [5] Hadi, Nabilah Abdul, and Md Hafizur Rahman. "Green Solvent Modification of Starch: Ionic Liquids (ILs) and Supercritical Carbon Dioxide (ScCO₂)." *Advanced Research in Starch*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. 117-162.
- [6] Jhanji, Ishank. "The Role of Ionic Liquids in Green Solvent Chemistry: Properties and Applications." *International*

- Research Journal of Engineering & Applied Sciences 11 (2023): 57-67.
- [7] 化学工程.绿色溶剂为载体的聚合物包覆膜在分离回收镓中的应用及机理研究[D]. 2023.
- [8] 詹蕾,张宁,许莉莉,等.绿色溶剂 AP-BF₄ 离子液体的紫外光谱分析[J].山东化工, 2019, 48(7):2.
- [9] 张宏丽.低共熔溶剂绿色可持续提取特色食品资源中的生物活性物质[D].山西农业大学,2023.
- [10] 徐丹萍,刘晓侠.化学制药中绿色溶剂及无溶剂合成技术探析[J].化工中间体, 2020, 000(016):23-24.
- [11] 肖建军.若干精细化学品的新型绿色合成工艺研究[D].南昌大学,2019.
- [12] 肖丰收.绿色合成:制备沸石分子筛催化材料的新路线[J].催化学报, 2019, 40(s1):26-29.
- [13] 刘双艳.绿色溶剂型 PTFE 纳米纤维膜材料的构建及其防护性能研究[D].东华大学,2023.
- [14] 赵金荣,李宝鑫,薛晓霞,等.新型绿色溶剂在中药提取中的应用概述[J].药学研究, 2023, 42(2):130-135.
- [15] 张鹏宇.绿色溶剂加工的高效四元有机太阳能电池的制备及光伏性能研究[D].内蒙古师范大学,2023.
- [16] 渠娅娟.绿色溶剂分离含甲醇共沸物的相平衡及机理研究[D].青岛科技大学,2023.

版权声明: ©2024 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS