

转光剂及农用转光膜的应用研究进展

薛 嵩^{1,2}, 胡宏志^{1,2}, 林宇豪^{1,3}, 刘 洋^{1,2,3}, 刘尊奇^{1,2,3*}

(1. 新疆农业大学化学化工学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;

2. 聚合物新型成型装备国家工程研究中心新疆分中心, 新疆 乌鲁木齐 830052;

3. 新疆农业化学与生物材料重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:系统综述了稀土有机配合物转光剂、稀土无机化合物转光剂、有机荧光染料3种转光剂,以及常用的合成方法,如高温固相法、共沉淀法、溶胶-凝胶法、水热合成法,并对农用转光膜的研究进展和未来发展的机遇与挑战进行总结归纳。

关键词:稀土转光剂; 分类; 合成方法; 转光性能; 转光膜

中图分类号: TB333

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)08-0033-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.08.007

Research progress on the application of light conversion agents and agricultural light conversion films

XUE Song^{1,2}, HU Hong-zhi^{1,2}, LIN Yu-hao^{1,3}, LIU Yang^{1,2,3}, LIU Zun-qi^{1,2,3*}

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. Xinjiang Branch, National Engineering Research Center for New Polymer Molding Equipment, Urumqi 830052, China;

3. Key Laboratory of Agricultural Chemistry and Biological Materials in Xinjiang, Urumqi 830052, China)

Abstract: This paper systematically reviews three kinds of light conversion agents: rare-earth organic complex light conversion agents, rare-earth inorganic compound light conversion agents, and organic fluorescent dyes. It also covers common synthesis methods, such as high-temperature solid-state method, co-precipitation method, sol-gel method, and hydrothermal synthesis. Furthermore, it summarizes and concludes the research progress of agricultural light conversion films and the opportunities and challenges for their future development.

Key words: rare-earth light conversion agent; classification; synthetic method; light conversion performance; light conversion film

随着全球工业化的不断发展以及人口的快速增长,对粮食的需求量不断增加,粮食问题已迫在眉睫。面对粮食短缺问题,各国学者开始进行探索,其中提高农作物产量被认为是最适宜的方法。相较于种子培育、肥料栽培而言,如何使农作物更高效地进行光合作用是一种更为环保的方法。在农作物生长过程中离不开光的作用,通过研究表明,农作物利用叶绿素进行光合作用时对光的吸收具有一定的选择性^[1-2]。阳光中的蓝紫光(400~490 nm)和红橙光(600~690 nm)有利于提高农作物光合作用的效率,促进农作物根茎的发育,从而促进农作物的生长。阳光中的紫外线(280~395 nm)不仅会阻碍农作物的生长,还会产生一定的病虫害以及细菌的滋长^[3]。因此,如何将光转换为有益光质成为研究热点。在20世纪80年代,前苏联科学家 Lepaev 提出

了转光剂农用膜这一复合功能材料,通过转光剂将不利于农作物生长的光质,转换为促进农作物进行光合作用的蓝紫光,以达到提高作物产量的目的。近年来,随着科技水平的不断进步,转光剂农膜飞速发展,已成为现代农业中不可分割的一部分^[4]。

转光剂农膜的高效光转换性能的关键在于转光剂,相关文献记载,转光剂可以分为很多种类,根据发光性质的不同,可以分为蓝光转换剂、红光转换剂^[5]。根据材质配体的不同可以分为稀土有机配合物光转换剂、稀土无机化合物光转换剂、有机荧光染料^[6]。我国是世界农业大国,随着科技兴农的提出,预计在2026年农用膜产量将达到110万t左右^[7]。对于转光剂农膜的发展而言,既是机遇也是挑战,一方面,市场高需求量以及国家政策扶持,促进转光剂农膜发展的不断进步,带来广阔发展前景。

收稿日期: 2025-10-23; 修回日期: 2026-06-03

基金项目:新疆维吾尔自治区重点研发专项(20220264-3);新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2022D01A76);新疆“天山英才计划”项目(XJTP2021087);新疆农业大学研究生科研创新计划项目(XJAUGRI2022049)项目;新疆农业大学大学生创新项目(2022453);新疆维吾尔自治区农业工程重点学科支持项目(XJZD202208)

作者简介:薛嵩(2001-),男,硕士生;刘尊奇(1986-),男,博士,教授,研究方向为化学功能材料及生物质资源化利用,通讯联系人, zunqi85@163.com。

另一方面,也要与时俱进,在高效的前提下,节能环保,以减缓化石资源的损耗。本文中以国内外转光剂的重点研发为基础,综述了转光剂的分类、合成方法,以及对转光剂农膜的应用前景与存在的问题进行了总结。

1 转光剂的分类

转光剂的转光功能是通过镧系离子实现的,如 Eu^{3+} 、 Tb^{3+} 、 Sm^{3+} 等镧系离子。但单一的镧系离子很难发光,由于镧系离子的 $4f-4f$ 跃迁无法实现自旋。因此需要通过与有机/无机配体之间协同,将能量传递给镧系离子,从而激发镧系离子的发光特性^[8]。由于转光剂之间的材料性质不同,因此将转光剂分为稀土有机配合物转光剂、稀土无机化合物转光剂、有机荧光染料3大类^[9]。根据发光能力又可分为蓝光转光剂和红光转光剂。根据转光剂的转光能力可以分为绿光到红光,紫光到红光和蓝光。本文将重点介绍稀土有机配合物转光剂、稀土无机化合物转光剂、有机荧光染料3种转光剂。图1为转光剂的分类、应用。

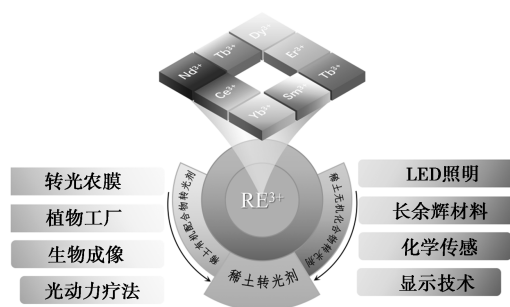


图1 稀土转光剂的分类、应用

1.1 稀土有机配合物转光剂

稀土有机配合物转光剂是通过镧系离子与有机配体之间通过配位共价结合相互作用而形成的。其中有机配体中的有机分子充当配体,在高频光的条件下激发时会产生 $\pi-\pi^*$ 吸收,从而将能量传递给镧系离子中的电子,使镧系离子中电子从基态转移至激发态,当电子返回至基态时,镧系离子会产生

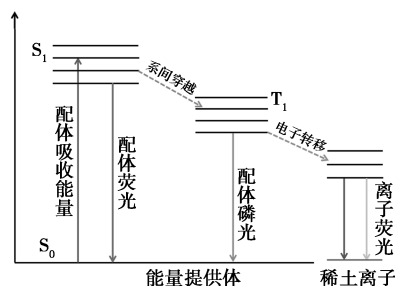


图2 稀土有机转光剂分子内能量转移过程

特定荧光。图2为稀土有机转光剂分子内能量转移过程。

稀土有机配合物转光剂作为最常用的转光剂之一,具有与塑料基质的相容性高、制膜工艺简单、光热稳定性好以及光转换效率高等优点,广泛用于转光剂农膜的制备。为了使植物更高效地进行光合作用,Zhao等^[10]合成了3种 $\text{Eu}(\text{III})$ 的稀土有机配合物光转换剂,使用TPA、HTTA、Phen为有机配体部分,合成了单核复合物 $\text{Eu}(\text{TTA})_3\text{Phen}$ 、双核复合物 $\text{Eu}_2(\text{TPA})(\text{TTA})_4\text{Phen}_2$ 以及链多核复合物 $\text{Eu}(\text{TPA})(\text{TTA})\text{Phen}$ 。3种转光剂均有良好的热稳定性和光学稳定性,且表现出较强的红色荧光特性,其优良的性能能够更好地促进植物生长。除此以外,周明明等^[11]采用掺杂多核稀土离子,制备了 $\text{Eu}_{0.1}\text{Sm}_{0.8}\text{Y}_{0.1}(\text{Hsal})_3\text{Phen}$ 转光剂。通过调控不同稀土离子间的掺杂浓度,以达到调控不同发光需要的目的。研究发现,随着 Sm^{3+} 浓度的不断增加,可以拓宽转光剂在红光区域的荧光光谱,从而可以更好地与农作物光合作用吸收光谱相匹配。实验表明,制备的新型转光剂有较强的热稳定性和优良的发光性能,在615、650 nm处均具有较强的荧光发射峰,自然耐候性强,可用于转光剂农膜的应用。

稀土有机配合物转光剂也存在一些缺点,如大多数转光剂农膜使用以 Eu^{3+} 的有机配合物作为转光剂,其特征峰位于610 nm左右,与植物光合作用的吸收光谱匹配度较低。此外,有机配合物转光剂的荧光寿命较短,转光衰减较快,耐候性相对较差,以及制备过程中需要使用有机物作为配体,会产生一定量的污染,制作成本较为昂贵都是目前稀土有机配合物转光剂需要改进的问题。

1.2 稀土无机化合物转光剂

稀土无机化合物转光剂包含基质与掺杂剂(活化剂、共活化剂、共溶剂等)2部分,通过将掺杂剂掺杂到无机盐基体、氧化物中制备得来的光转换材料。其中,基质部分应有特定的缺陷,阴阳离子具有一定的光学透明性。稀土无机化合物转光剂发光原理主要为基质化合物吸收能量后将能量传递给稀土离子,稀土离子获得能量后产生相应的跃迁。除此以外还包括其他过程,如稀土离子直接吸收能量后进行跃迁。

与稀土有机配合物转光剂比较,稀土无机化合物转光剂具有成本低廉,生产工艺简单,对环境污染危害较小,便于调节以及转光性能稳定寿命期长等优点,是主流的农用转光材料。Zhang等^[12]采用高

温固相法制备了 $\text{Ca}_2\text{Sr}(\text{PO}_4)_2:\text{Ce}^{3+}、\text{Mn}^{2+}、\text{Na}^{+}$ 磷光粉,可在 645 nm 处产生荧光发射峰。并且通过漫反射光谱显示,共掺杂荧光粉在 320 nm 处具有较强的吸收能力,能够减缓农用膜的老化。共掺杂的磷光粉能够在水中保持较好的稳定性,提高阳光转化效率。与塑料基质结合后,能够提高农用转光膜的自然耐候性,在农用转光膜领域具有应用潜力。

稀土转光剂中的稀土离子多为 3 价离子,一方面是因为 3 价稀土离子的 f-d 型跃迁受配位环境影响较大,可调控性更高。另一方面 2 价稀土离子的 f-f 跃迁容易受 $5s^25p^6$ 亚壳层的影响使发射波长被固定,可调控性低。若能突破 2 价稀土离子的跃迁限制,将大大减少制作成本,创新了农业薄膜的使用。Wu 等^[13]制备了 $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}^{2+}$ 稀土无机转光剂农膜。通过扫描电镜观察到转光剂为直径 500 nm 的不规则颗粒状。研究表明,随着转光剂的加入,提高了转光膜的机械强度。当制备的转光剂在激发波长为 421 nm 时,发射峰为 616 nm,可以被蓝紫光激发后发出红光。对应 Eu^{2+} 离子的 $4f^7-4f^65d$ 跃迁。通过植物种植实验表明,经过转光剂农膜处理后的白菜产量有所提高,也间接说明了红光促进了农作物的光合作用。

相较于稀土无机化合物转光剂的优势而言,其缺点也很明显。现有的稀土无机化合物转光剂具有亲水、极性以及表面高自由能的特点,不符合一些疏水、非极性、低自由能聚合物的要求,容易导致转光剂在农业塑料薄膜中产生不良分散和凝聚,使得农业薄膜的光透过率和均匀性降低,加工后性能差,无法达到预期结果,以及与聚合物的相容性差等缺点。因此,对稀土无机化合物表面改性已迫在眉睫。

1.3 有机荧光染料

有机荧光染料类转光剂是通过多种有机荧光物质合成的,通常包含有机共轭体系和多个发色团。利用自身的显色基团对紫外线进行吸收,随后通过电子的能级跃迁发出荧光^[14]。具有共轭刚性平面结构,可用于生命领域、环境领域、材料领域以及农业领域。

有机荧光染料主要分为 3 大类:香豆素类、茋烷衍生物类(含罗丹明类)、1,8-萘酰亚胺类,除此以外还包含少量的二苯乙烯类^[15]。相较于上述 2 种转光剂,有机荧光染料与树脂具有更好的相容性以及可调节发射波长等优点,能够与不同农作物的吸收光谱相吻合,制备出不同的农用转光膜,且制作简单能效高,能够广泛应用于农业领域^[16]。Yu 等^[17]

研发了新型的黄绿光转光剂,合成了 6 种不同取代的 PDI 衍生物,通过实验测定,m-MeOPTCDA 为最佳黄绿光转光剂,成功实现了 430 nm 蓝紫光、650 nm 红光的发射,且最佳激发波长位于紫外区域和黄绿光区域。并且通过调整 PDI 衍生物与 TPA 之间的不同比例,有望实现不同农作物的生长需要。

有机荧光染料作为转光剂的一种,目前仍有许多缺陷限制着它的使用,如易荧光猝灭导致光稳定性差,使用过程中易氧化分解,成本较高,降解过程复杂且对自然环境会产生一定污染,转换效率低,因此具有一定的局限性。表 1 对 3 种转光剂的优缺点进行了总结归纳。

表 1 不同种类转光剂的优缺点比较

类别	优点	缺点
稀土有机配合物转光剂	光热稳定性好,相容性好,制膜工艺简单,光转换效率高	成本高,寿命短,制作过程中会产生一定的环境污染且发射光谱与光合作用吸收光谱匹配度较差
稀土无机化合物转光剂	成本低廉,生产工艺简单,污染小,寿命较长,光调整便捷	表面自由能高,具有亲水、极性等特点,与农业薄膜结合易产生聚集
有机荧光染料	相容性好,应用范围广,能效高	荧光易淬灭,光稳定性差,易氧化分解,降解过程复杂成本高,光转换效率低

近年来,我国转光膜产业领域发展迅速,但仍有一些不足。现有的稀土转光剂大多是以稀土金属 Eu 为核心,然而其特征峰在 613 nm 左右,这与叶绿素的红光吸收(620~660 nm)匹配度并不高,结果差强人意^[11]。耐候性普遍较差,寿命短且转光速率较低,成本高且对环境有一定污染。为减少资源损耗与环境污染,在保证转光性能的同时,应开发环保低耗型转光剂。

2 转光剂的合成方法

不同转光剂的合成方法有所不同,常见的合成方法有高温固相法、共沉淀法、水热合成法、溶胶-凝胶法以及一些其他方法。选择合适的合成方法可以更好地发挥出转光剂的性能^[4],本文中重点讲述以上 4 种常见的合成方法。

2.1 高温固相法

高温固相法是指按照一定比例称取相应的原料,将原料均质后放入坩埚中,在一定时间内,高温

的环境下进行烧结,随后将所得材料进行冷却清洗、粉碎、筛选而得到固体样品^[18]。高温固相法所制备的转光剂材料发光强度高、晶体结构好,是一种简易的制作方法。但由于需要高温,并不适合用于制备稀土有机转光剂与有机荧光染料。长时间的高温容易导致颗粒分布不均匀,需要根据不同需求进行筛分,且在粉碎筛分时会对晶体造成一定的损伤,从而影响发光性能。

2.2 共沉淀法

共沉淀法是指在制备的稀土离子盐溶液中加入沉淀剂进行搅拌,利用不同的温度、pH 控制共沉淀反应的速度,待共沉淀反应彻底结束后,将沉淀物取出,进行离心分离、洗涤干燥等操作,以获得目标产物^[19]。共沉淀法具有操作简单、成本低廉、溶液混合均匀、反应周期短以及所得产物性能好、稳定性强等优点。但同时也具有一定缺陷,如在反应过程中因杂质而导致产生胶体沉淀,在洗涤时需要耗费大量时间。

2.3 溶胶-凝胶法

溶胶-凝胶法简称 SG 法,是指在高纯度、一定温度下将含高化学成分的化合物作为前驱体,在液相中进行均匀混合后,通过水解、缩合等反应形成溶胶体系,溶胶在经过聚合后形成凝胶。将所得凝胶干燥后进行烧结,最后得到目标功能材料^[20]。溶胶-凝胶法相较于高温固相法而言,在反应过程中不需要过高温,且在反应过程中能对各组分之间的浓度进行调整,所得产物均匀性好、纯度高。但该方法仍有一些不足,如成本高、反应相对复杂、所需时间长、对实验环境要求高,导致无法实现大规模工业化生产。

2.4 水热合成法

热液合成法是指以水为介质,利用水的高温高压性质,减少物质反应所需要的能量,在反应器中加热加压,在封闭的状态下经过复杂的化学反应得到所需发光材料^[21]。水热合成法所制备的材料具有颗粒粒径小且分布均匀等优点,反应条件温和,不需要高温煅烧,晶体较完整。然而水热合成法需要在高温高压下进行,对实验设备要求高,不适合应用于大规模工业化生产。

3 转光剂在农业薄膜领域的应用

稀土转光剂农膜作为一种“光肥”,能够提高农作物产量和改善设施环境^[22]。自 20 世纪 80 年代,我国引用转光剂农膜用于农业领域,开启了对转光

剂农膜的系统性研究^[23]。至 2010 年左右,转光剂农膜领域的发展已日趋完善,从单一的将紫外线光转换为蓝光到如今的红光、蓝紫光、红橙光以及橙光,且所制作的转光剂农膜的透光率、光转换效率也得到提高,大大提高了农作物的产量^[24]。

相较于上述传统转光剂农膜,近年来,我国转光剂农膜的发展在确保高效转光速率的前提下,开始朝绿色环保方向发展。Chu 等^[25]利用碳点和 FSi-SiO₂ 与 OMMT 相结合,制备了可以与 LLDPE、PE 良好混合的复合材料 FSi-SiO₂/CD@OMMT。所开发的新型农用塑料薄膜,在具备转光功能的同时,还具备自清洗功能。研究表明,PE/FSi-SiO₂/CDs@OMMT 具有良好的热稳定性、疏水性以及抗藻类依附性能,防污和除尘性能,防污率为 99.84%,除尘效率为 99.58%。是一种可推广的农用薄膜。Yang 等^[26]利用羧甲基木聚糖作为基体,木聚糖衍生物为碳点,制备了具有光转换功能的纳米复合膜。在 376 nm 处激发下,可在 540 nm 处发射出蓝光,有利于植物的生长。

于稀土转光剂而言,木聚糖衍生物制作的碳点充当光转换剂具有低成本、污染小等优点。目前,我国转光剂农膜常作为温室大棚膜使用,用作覆盖膜还较少。传统地膜大多使用 PE、PVDF 等石油基塑料制作,使用后的残留碎片无法自然分解,危害生态环境,造成环境污染^[27]。Yu 等^[27]以 PLA/PBAT 为基质,制作了一种可自然降解的转光剂农膜,且可用作覆盖膜。推动了光转换覆盖膜的发展。同时,Jiang 等^[28]将稀土发光材料 CaAlSiN₃:Eu²⁺ 进行改性后与 PLA 结合制备了 2 种可自然降解的光转换农膜,研究表明,2 种光转换膜在 600~630 nm 处具有较强的红色荧光发射,是一种高效环保的光转换膜材料。

随着农业种植水平的提高,纳米光转换剂步入大众视野。纳米光转换剂主要是指掺杂稀土的纳米材料、量子点、碳基纳米类材料等。能够将不利于光合作用的波段(UV)转换为促进植物光合作用的蓝光或红橙光波段,具有光稳定好、转换效率高等优点^[29]。张雪等^[30]制备了一种纳米 Fe₃O₄/纤维素复合转光膜,该材料以 NMMO 为基质,NaOH 为沉淀剂,具备高机械强度、高透光率的同时,可以发出蓝光,促进白菜的生长。截至目前为止,纳米光转换膜仍处于起步阶段,仍有很多不足,但发展前景具有广阔空间。

因转光剂的掺杂,使得传统农业膜具备了新的

功能,不仅可以强紫外光转换为红光等有益光,还可以在雾霾等弱光情况下进行有效补光,使农业补光材料的种类也进一步得到完善。随着化石能源的短缺,传统转光剂农用薄膜的发展已陷入瓶颈。生物质基材料作为一种可再生资源,如木质素、淀粉等,具有可生物降解的特性,可替代传统化石基质。以生物质基材料作为转光剂农膜的基质,可大大减小对环境的污染。现如今,我国可生物降解类转光剂农用膜发展逐步完善并在应用领域取得一定成果,总体向好但仍然有一定不足。

4 转光剂农膜的机遇与挑战

我国转光剂农膜研究相较于西方国家而言起步较晚,但随着政策的扶持以及需求量的增加,为转光剂农膜领域带来许多机遇。预计在 2026 年,我国农用膜生产量将达到 110 万 t 左右。带来机遇的同时也面临许多挑战,一方面,现如今所制备的转光剂农膜存在一定缺陷;另一方面,与国外相比,国内转光剂农膜大多为农用大棚膜,缺少地膜。以下问题仍需改进。

(1) 转光剂农膜寿命较短

耐候性差是转光剂农膜普遍存在的问题,在使用过程中,受自然环境的影响,如自然风化、降水、低温等因素,使得转光剂的转光性能下降,导致转光剂农膜的寿命大打折扣。

(2) 薄膜基质种类单一,化石塑料居多

传统转光剂农膜经自然风化破碎后会产生微塑料,不仅危害人体健康,对环境的污染也十分严重。而可生物降解类转光剂农膜则会减少对自然环境产生污染。

(3) 透明度低,分散性差

目前大多数转光剂农膜的制备都是将转光剂直接加入至塑料基质中,该制备方法虽然操作较简单,但会导致转光剂在转光剂农膜中的分散性差,从而导致透明度低,影响光学性能。

(4) 原料价格昂贵且性能单一

用于大规模生产的转光剂农膜大多为蓝光转换膜和红光转换膜,相较于昂贵的成本,投入与回报不呈比例。由于性能单一,无法适配所有农作物的需求,应研发一些红光蓝光复合转换的材料。

综上所述,我国转光剂农膜领域发展总体向好,面对目前发展的问题,相信在未来会得到改善。预计在不远的将来,会制备出品质优良、价格低廉且光转换性能优秀的转光剂农膜。

参考文献

- [1] Horri E H, Vitiello M, Ceccanti C, *et al.* Ultraviolet-to-blue light conversion film affects both leaf photosynthetic traits and fruit bio-active compound accumulation in fragaria×ananassa[J]. *Agronomy*, 2024, 14(7): 1491–1510.
- [2] Gao Y X, Li G F, Cai B B, *et al.* Effects of rare-earth light conversion film on the growth and fruit quality of sweet pepper in a solar greenhouse[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13(1): 989271–989281.
- [3] Sun Q M, Hu Q M, Lin Z X, *et al.* Preparation and application of light conversion film for exploiting solar energy[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 827(827): 44–48.
- [4] Zhang N. Research progress of rare earth light conversion agent materials for agricultural film[J]. *Materials Research Express*, 2024, 11(9): 092001–092018.
- [5] Sun Q M, Hu G Q, Yu Y S, *et al.* Preparation and luminescence properties of $\text{Ca}_{0.8-x}\text{Sr}_{0.2}\text{F}_2:\text{xEu}^{2+}$ blue light conversion agents[J]. *Science of Advanced Materials*, 2017, 9(3): 519–522.
- [6] Wang D M, Yu Y L, Xue A, *et al.* Polylactide/poly(butylene adipate-co-terephthalate)/rare earth complexes as biodegradable light conversion agricultural films[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2019, 30(1): 203–211.
- [7] Isha G, Sitender S, Shri B, *et al.* Rare earth (RE) doped phosphors and their emerging applications: A review[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(14): 19282–19303.
- [8] Li M, Huang R, Fu Z Q, *et al.* Multi-functional luminescent coating for wood fabric based on silica Sol-Gel approach[J]. *Polymers*, 2020, 13(1): 127–137.
- [9] Feng J, Zhang H J. Hybrid materials based on lanthanide organic complexes: A review[J]. *Chemical Society Reviews*, 2013, 42(1): 387–410.
- [10] Zhao X H, Huang K L, Jiao F P. Syntheses and applications of $\text{Eu}(\text{III})$ complexes of 2-thienyltrifluoroacetate, terephthalic acid and phenanthroline as light conversion agents[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2007, (1): 62–67.
- [11] 周明明, 刘威, 杨成祥, 等. 多核稀土离子掺杂有机配合物转光剂的制备与应用[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(4): 2131–2139.
- [12] Zhang J C, Zhang X G, Zhang J L, *et al.* Near-UV-to-red light conversion through energy transfer in $\text{Ca}_2\text{Sr}(\text{PO}_4)_2:\text{Ce}^{3+}, \text{Mn}^{2+}$ for plant growth[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5(46): 12069–12076.
- [13] Wu W B, Zhang Z B, Dong R Y, *et al.* Characterization and properties of a $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}^{2+}$ -based light-conversion agricultural film[J]. *Journal of Rare Earths*, 2020, 38(5): 539–545.
- [14] Wang J, Qiao X, Li B, *et al.* The research progress of rare earth agricultural light conversion film[J]. *Heliyon*, 2024, 10(17): e36967–e36979.
- [15] Jia J H, Sheng W J, Gao J R. Research progress of organic fluorescent dyestuff[J]. *Chemical Indust Time*, 2004, (1): 18–22.
- [16] Wang Y T, Qian Z A, Li X M, *et al.* Exploration of high-performance light-conversion agents based on cyanostilbene and phenanthrene-carbonitrile backbones: E/Z and position isomerism, high-contrast Michael addition reaction activity and intramolecular photocyclization[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2021, 9(37): 12681–12693.

(下转第 43 页)

- trices and machine learning prediction [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 477: 135291.
- [15] Zhang C, Sun W, Wei H, *et al.* Application of artificial intelligence for predicting reaction results in advanced oxidation processes [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, 23: 101550.
- [16] Ashkanani Z, Mohtar R, Al-Enezi S, *et al.* Efficacy of advanced Fenton-photo systems for the degradation of petroleum hydrocarbons using complex neural networks [J]. *RSC Advances*, 2026, 16 (3): 1993–2006.
- [17] Li H, Jiao Y, Davey K, *et al.* Data-driven machine learning for understanding surface structures of heterogeneous catalysts [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2023, 62 (9): e202216383.
- [18] Hua T W, Huang G X, Qian C, *et al.* Data-driven recursive kinetic modeling for Fenton reaction [J]. *Environmental Science & Technology*, 2025, 59 (45): 24473–24480.
- [19] Hou F, Liu S, Yin W X, *et al.* Machine learning for high-precision simulation of dissolved organic matter in sewer: Overcoming data restrictions with generative adversarial networks [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 947: 174469.
- [20] Hernández-García S, Cuesta-Infante A, Moreno-SanSegundo J Á, *et al.* Deep reinforcement learning for automated search of model parameters: Photo-fenton wastewater disinfection case study [J]. *Neural Computing and Applications*, 2023, 35 (2): 1379–1394.
- [21] Cheng Y, Zhang G, Chen Z, *et al.* Unraveling electronic structure modulation mechanism in cobalt spinel Fenton-like catalysis by integrating density functional theory and machine learning [J]. *Water Research*, 2026, 289: 124915.
- [22] Ezati S, Ganjidoust H, Ayati B. Hybrid application of response surface methodology (RSM) and machine learning for multi-objective optimization of heterogeneous electro-Fenton process in pharmaceutical wastewater treatment [J]. *Results in Engineering*, 2026, 30: 109818.
- [23] Fu H, Li K, Zhang C, *et al.* Machine-learning-assisted optimization of a single-atom coordination environment for accelerated Fenton catalysis [J]. *ACS Nano*, 2023, 17 (14): 13851–13860.
- [24] Xiao Z, Yang B, Feng X, *et al.* Density functional theory and machine learning-based quantitative structure – activity relationship models enabling prediction of contaminant degradation performance with heterogeneous peroxymonosulfate treatments [J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57 (9): 3951–3961.
- [25] Wang J, Huangfu X, Huang R, *et al.* Evaluating degradation efficiency of pesticides by persulfate, Fenton, and ozonation oxidation processes with machine learning [J]. *Environmental Research*, 2025, 277: 121548.
- [26] Baghani M, Soltanian M, Sarrafzadeh M H. Energy optimization in electrochemical oxidation for wastewater treatment using interpretable machine learning [J]. *Chemical Engineering Journal Advances*, 2026, 25: 101044.
- [27] Shin Y U, Kim D, Yu S, *et al.* Smart control of oxychlorine species using reinforcement learning in saline electrochemical oxidation [J]. *npj Clean Water*, 2025, 8 (1): 102.
- [28] Yuan Q, Wang X, Xu D, *et al.* Machine learning-assisted catalysts for advanced oxidation processes: Progress, challenges, and prospects [J]. *Catalysts*, 2025, 15 (3): 282.
- [29] Li N, Xu J, Gao W, *et al.* Machine learning-enabled advanced oxidation processes: Catalytic active site engineering, oxidation pathway regulation, and reaction condition optimization [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2026, 528: 172413.
- [30] Gao W, Xu Y, Chang X, *et al.* Machine learning-driven global optimization of single-atom catalyst-mediated advanced oxidation processes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2025, 59 (44): 24044–24054. ■
-
- (上接第 37 页)
- [17] Yu Y J, Wang Y J, Liu W J, *et al.* Exploration of highly efficient light conversion agents for agricultural film based on the bay-substituted perylene diimides derivatives [J]. *Dyes and Pigments*, 2018, 15 (9): 483–490.
- [18] Li J F, Zhang H R, Wang P, *et al.* Luminescence properties of high-quality $\text{Ca}_2\text{Si}_5\text{N}_8 : \text{Eu}^{2+}$ phosphor: CaH_2 -raw material [J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2013, 2 (9): R165–R168.
- [19] 阎峰云, 高红梅, 刘兰, 等. 共沉淀法 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6 : \text{Eu}^{3+}$ 荧光粉的制备研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2015, 34 (9): 2487–2490, 2495.
- [20] 刘书彤, 周建伟, 刘耕, 等. 含吡啶环稀土配合物的合成与表征 [J]. *辽宁化工*, 2025, 54 (7): 1089–1092.
- [21] 张丽华. 水热法稀土掺杂 LaF_3 发光材料的制备及其荧光性能研究 [J]. *陶瓷*, 2021, (1): 24–30.
- [22] Li J J, Zhang L L, Zhang X, *et al.* Effects of light conversion film on the growth of leafy vegetables in facilities under haze weather [J]. *Agronomy*, 2022, 12 (10): 2391.
- [23] 梁溥森, 李会兴, 梁佩琼, 等. L-蓝光膜的研究和试验 [J]. *中国塑料*, 1995, (1): 53–56.
- [24] 廉世勋, 毛向辉, 吴振国. 稀土无机发光材料 $\text{CaS} : \text{Eu}, \text{Cl}$ 的过程优化和在农膜上的应用原理 [J]. *稀土*, 1996, (3): 27–31.
- [25] Chu X H, Zhang P, Shi S Z, *et al.* Hydrophobic self-cleaning micro-nano composite polyethylene-based agricultural plastic film with light conversion and abrasion resistance [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 65 (8): 130621–130630.
- [26] Yang Y, Zhao Y, Hu Y, *et al.* Xylan-derived light conversion nano-composite film [J]. *Polymers*, 2020, 12 (8): 1779–1787.
- [27] Yu Y L, Xu P F, Jia S L, *et al.* Exploring polylactide/poly (butylene adipate-co-terephthalate)/rare earth complexes biodegradable light conversion agricultural films [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 127 (2): 10–21.
- [28] Jiang Y P, Yan C P, Zhang H, *et al.* Biodegradable polylactide/rare earth complexes in light conversion agricultural films [J]. *Coatings*, 2021, 11 (2): 139–142.
- [29] Yu X R, Pu H B, Sun D W. Nano light conversion agents: Recent advances, future prospects and challenges in enhancing plant green cultivation [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 426 (21): 138919–138931.
- [30] 张雪, 刘志明, 余慧, 等. 纳米纤维素复合转光膜的制备及应用进展 [J]. *广东化工*, 2017, 44 (7): 144–145. ■