

DOI:10.12405/j.issn.2097-1486.2025.02.006

基于共振能量转移机制的人工光捕获体系 应用研究进展

蒋维维, 张灯青, 易涛*

东华大学 化学与化工学院, 上海 201620

摘要:近年来,基于 Förster 共振能量转移(FRET)机制的人工光捕获系统(ALHSs)因其高效的光能捕获与定向传递特性,在化学、生物与材料科学等学科领域中展现出广阔的应用前景,正在成为跨学科研究的前沿热点。基于 Förster 共振能量转移机制的人工光捕获系统具有以下优势:①高效的能量定向传递:通过供体-受体(D-A)分子的精确光谱匹配与空间排布(1~10 nm),构建级联能量传递网络,量子效率可超过80%,显著提升光能捕获效率;②优异的多级能量传递能力:能够实现多步骤能量转移,提高能量利用效率;③出色的可逆性和可调控性:可通过外部刺激(如光、化学物质)动态调控能量的传递过程。基于 Förster 共振能量转移机制的人工光捕获系统近年来实现了跨越式发展,并在基础理论与技术应用层面取得一系列突破性成果。该领域有望突破能效与功能瓶颈,通过多学科协同创新推动其向能源、医疗、信息等跨领域应用的革新性渗透。本文系统梳理了基于 Förster 共振能量转移机制的人工光捕获系统在催化转化、光学防伪、生物应用及精准检测四大应用方向的研究进展,并深入探讨了该领域目前存在的挑战与未来发展方向。

关键词:人工光捕获系统;Förster 共振能量转移;分子自组装;超分子化学

中图分类号:O614

文献标志码:A

文章编号:2097-1486(2025)02-0179-21

Research advances of FRET-based artificial light-harvesting systems

JIANG Weiwei, ZHANG Dengqing, YI Tao*

College of Chemistry and Chemical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China

Abstract: In recent years, artificial light-harvesting systems based on Förster resonance energy transfer (FRET) mechanism have become cutting-edge interdisciplinary research in chemistry, biology and material science, etc. owing to their efficient light energy capture and directional energy transfer characteristics. FRET-based artificial light-harvesting systems have the following advantages: (1) Highly directional energy transfer. Precise spectral matching and spatial arrangement (1~10 nm) of donor-acceptor (D-A) pairs enable cascaded energy transfer networks with quantum efficiencies exceeding 80%, significantly surpassing conventional systems; (2) Superior multi-step energy transfer. Multi-level energy migration pathways enhance overall energy utilization efficiency; (3) Dynamic reversibility and tunability. External stimuli (e. g., light, chemical substances) allow real-time modulation of energy transfer dynamics. FRET-based artificial light-harvesting systems have recently achieved leapfrog development and made a series of breakthroughs in both fundamental theories and technological applications. This field is expected to break through the bottlenecks of energy efficiency and functionality, and promote its innovative penetration into cross-field applications of energy, healthcare, and information through multi-disciplinary collaborative innovation. This paper systematically reviews the research progress of FRET-based artificial light-harvesting systems in four major application directions, i. e. catalytic

*通信作者

基金项目:国家自然科学基金(22177019)

收稿日期:2025-04-27;修回日期:2025-06-05

conversion, optical anti-counterfeiting, biological application and precise detection, and deeply discusses the key challenges and future directions existing in this field at present.

Keywords: artificial light-harvesting systems; Förster resonance energy transfer; molecular self-assembly; supramolecular chemistry

0 引言

全球能源供需矛盾的加剧与化石能源不断消耗,使得开发高效可再生能源技术成为迫在眉睫的挑战,其中太阳能作为最具规模化的可再生能源,被人们寄予了厚望^[1-3]。自然界的光合作用一般包括光捕获、能量转移和能量转换三个过程,为太阳能向化学能的转化提供了最优方案,其中实现高效的光捕获最为关键。考虑到光捕获是自然光合作用的第一阶段,人们对光捕获体系(LHSs)的原理进行了深入细致的研究^[4-6]。自然光合作用通过色素分子(叶绿素/类胡萝卜素)的纳米级超分子组装形成有序阵列,实现宽谱带(400~700 nm)光子捕获,随后利用Förster共振能量转移(FRET)机制将能量传递到反应中心,最终达到大于95%的能量转换效率^[7-8]。受到自然光捕获系统的启发,研究人员正在努力构建多种用于太阳能转换的人工光捕获(ALHS)平台^[9-11]。发生有效能量转移的前提条件是能量受体和供体之间保持适当的距离,以及供体的发射光谱和受体的吸收光谱之间有良好的光谱重叠。因此,想要获得出色的人工光捕获系统,必须考虑以下因素:①能量供体应密集排列,由于分子间存在的 π - π 堆积作用,传统荧光团在紧密堆积时往往会表现出聚集引起的猝灭效应(ACQ),为了抑制传统荧光团的ACQ效应,人们采用了共价策略、超分子策略、构型刚性策略和聚集诱导发射(AIE)策略^[12];②较高的供体/受体比^[13],以超分子自组装体系为基础构建的人工光捕获系统可实现极高的供体/受体比;③光谱重叠,供体的发射光谱和受体的吸收光谱之间需要具有良好的光谱重叠。为了更加充分地利用人工光捕获系统捕获的能量,一些基于不同构建平台且集成了多种功能的人工光捕获系统已被报道。得益于优异的光捕获能力和结构可调等特性,上述人工光捕获系统已被开发应用于催化、防伪、生物应用、检测等领域。

1 催化

人工光捕获系统因其能够对太阳能进行有效转换和利用以促进能源的可持续发展而备受关注。利

用超分子自组装构建人工光捕获系统不仅可获得极高的供体/受体比,同时可实现较高的天线效应(AE)和能量传递效率(Φ_{ET}),为模拟自然光合作用创造了有利条件。特别是基于Förster共振能量转移机制的超分子人工光捕获系统在光化学催化领域显示出巨大的应用潜能。因此,近年来出现了各种基于超分子结构的人工光捕获系统,包括大环化合物、金属-有机配位复合物、类蛋白结构等类型,以实现如交叉偶联析氢反应、脱卤反应、光催化氧化反应、有氧交叉脱氢偶联(CDC)反应等。

为了获得稳定的能量供体,我们构建了一例基于四方铂(II)金属环(M1)的新型人工光捕获系统(图1)^[14]。基于四苯基乙烯(TPE)的金属-有机配位复合物具有聚集诱导发光(AIE)特性,可以作为理想的供体发色团,用作稳定的人工光捕获系统的供体分子,在水溶液中实现从M1到曙红Y(ESY)再到磺基罗丹明101(SR101)的高效能量转移。由于两步能量转移可以充分利用紫外光和可见光激活染料,因此扩展了光催化反应的激发光谱范围。为了更好模拟自然光合作用,M1-ESY-SR101系统被用于水溶液中C—H键的烷基化光催化反应。在含有1% M1-ESY-SR101的H₂O-THF(19:1, V/V)溶液中,持续光照1 h后,苯基乙烯基砜的转化率达到99%,2-(2-(苯基磺酰基)乙基)四氢呋喃的分离产率为48%。相比之下,M1-ESY催化剂的催化效率仅为21%,而M1-ESY-SR101体系在没有光照的情况下催化效率仅为10%,这表明采用两步连续能量转移的人工光捕获系统作为催化剂大大提升了催化效率。因此,基于金属环M1的人工光捕获系统在模拟自然光合作用方面具有潜在的应用前景。

得益于TPE独特的AIE特性,何成教授团队还通过TPE配体与锌离子的配位驱动自组装策略构建了一例高发射笼(Zn-1)。他们利用笼子带正电的特性封装了带负电的ESY,从而成功地构建了Zn@ESY(图2)^[15]。X射线单晶衍射数据显示,ESY被成功封装在了Zn-1的空腔中,使它们之间的相互作用更强且更加稳定。此外,受体分子ESY被固定在由刚性和高电荷配位笼提供的隔离微环境中,从而降低了其自猝灭的可能性。在375 nm波长

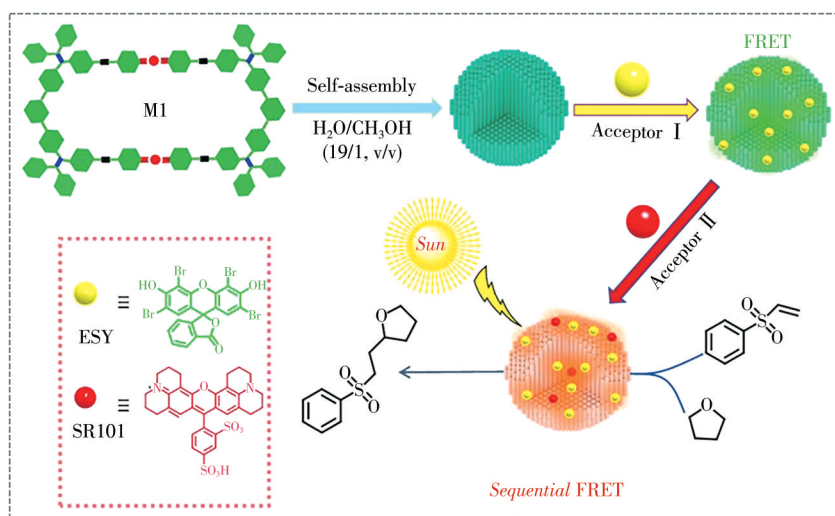


图1 以M1为构建单元设计合成的人工光捕获系统并将其用作光催化剂^[14]

Figure 1 Design and synthesis of ALHS using M1 as a building block and its application as a photocatalyst^[14]

的光激发下,随着ESY浓度的增加,Zn-1在485 nm波长处的发射峰逐渐降低,而在560 nm波长处出现了一个新的发射峰,同时,荧光颜色由蓝色变为黄色,表明Zn-1与ESY之间发生了有效的能量转移, Φ_{ET} 为82.4%。在绿光区域,ESY可作为光敏剂催化 α -溴苯乙酮的脱卤反应。由于Zn-1在紫外光区有很强的吸收能力,因此它可以作为天线,将能量从紫外光传输到ESY,从而引发催化反应。在530 nm

波长的照射下,Zn@ESY作为催化剂时,苯乙酮产率为83.4%。在365 nm波长的照射下,产率略低(76.1%),这表明除绿光外,Zn@ESY还通过Zn-1的吸收利用了紫外光,从而扩大了脱卤反应的催化光源范围。这项工作开发了一种通过笼状封装构建主-客体系统的方法,以提高Förster共振能量转移过程的效率,从而为模拟自然光捕获系统提供多功能平台。

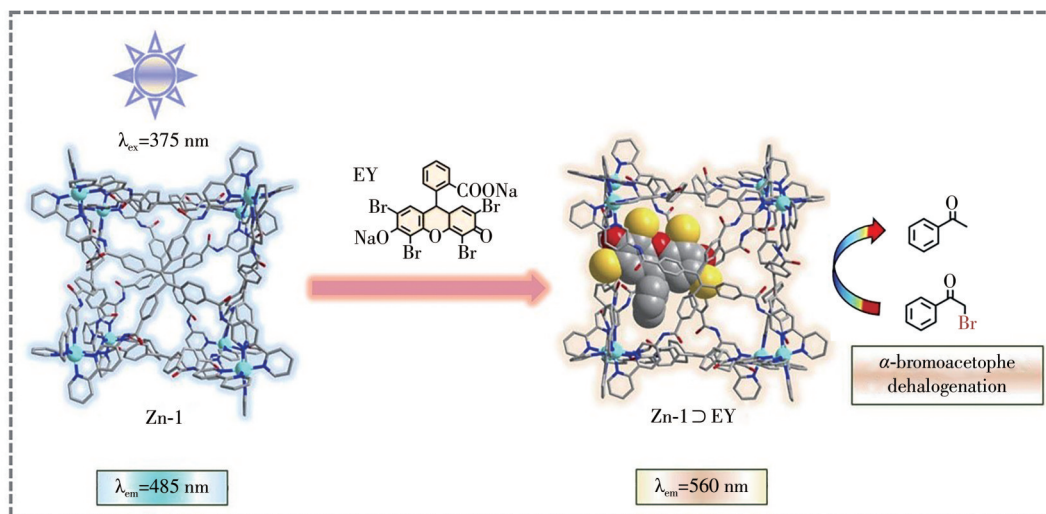


图2 Zn-1与封装ESY之间的主-客体策略示意图^[15]

Figure 2 Schematic representation of the host-guest strategy between Zn-1 and encapsulated ESY^[15]

利用类似的策略,邢令宝教授及其同事报告了一种级联人工光捕获系统,它能够在水溶液中实现催化有氧交叉脱氢偶联(CDC)反应(图3)^[16]。在主-客体相互作用的驱动下,氰基取代的对苯基乙烯衍生物(PPTA)中的三甲基铵可以被包裹在柱[5]芳烃

(WP5)的空腔中,形成具有多个疏水层的球形纳米颗粒(PPTA-WP5)。ESY和尼罗红(NiR)能够被依次封装在PPTA-WP5的疏水层中,实现了高效的两步能量转移过程。当PPTA-WP5/ESY的摩尔比为20:1时,第一步的 Φ_{ET} 和AE分别为67%和11.25;当

PPTA-WP5/ESY/NiR的摩尔比为20:1:0.5时,第二步的 Φ_{ET} 和AE分别达到66%和7.2。PPTA-WP5中的疏水层可用作在水中进行CDC反应的反应器,为其提供了一个良好的反应场所。得益于PPTA结构中的强疏水性和共轭作用,PPTA-WP5-ESY-

NiR与反应物之间的 $\pi-\pi$ 相互作用增强,从而提高了催化性能。用紫外光照射12 h后,产率可达82%。更重要的是,这种ALHS还适用于大规模合成四氢喹啉和吲哚衍生物。该工作表明了人工光捕获系统在模拟自然光合作用方面起到了极为重要的作用。

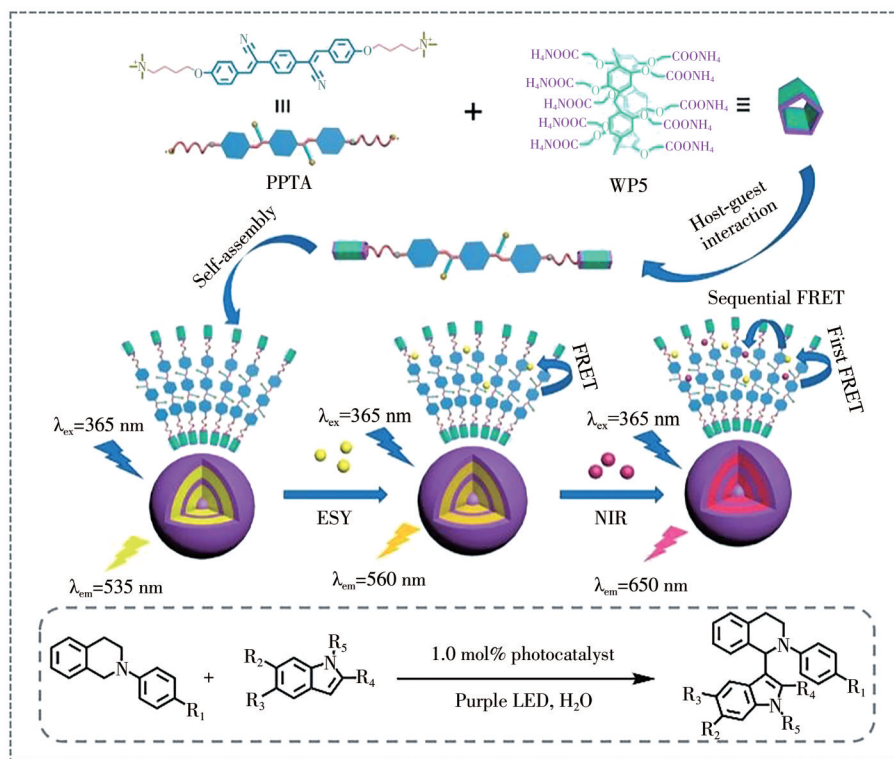


图3 水溶液中PPTA-WP5-ESY-NiR的构建过程及其用作催化剂对CDC反应进行催化^[16]

Figure 3 Construction process of PPTA-WP5-ESY-NiR in aqueous solution and its availability as a catalyst for CDC reaction^[16]

张健教授等人报道了一例高孔隙率且具光活性的金属-有机框架材料NPF-500-H₂TCPP(H₂TCPP=meso-四(4-羧基苯基)卟啉)(图4)^[17]。由于N,N'-二吡啶供体的发射光谱与卟啉的吸收光谱之间存在明显的光谱重叠,并且NPF-500-H₂TCPP中两个连接体之间的距离很近(14.8 Å),因此可以实现高效的Förster共振能量转移过程, Φ_{ET} 为69%。更令人惊讶的是,NPF-500-H₂TCPP可以作为一种理想的人工光捕获系统,利用传递的能量进行催化反应。它可以作为催化剂用于硫代苯甲醚光催化氧化反应,产率高达99%。

刘俊秋教授团队以环状稳定蛋白(SP1)为结构单元,制备出具有良好热稳定性与结构稳定性的二维蛋白质纳米片,并基于此开发了一种新型高效的人工光捕获系统。该人工光捕获系统不仅成功模拟了自然光捕获系统的结构与功能,且被拓展为水相介质中苯并噻唑与二苯基氧化膦析氢反应的高效催

化剂(图5)^[18]。所合成的层状纳米材料表面具有负电特性及含中心空腔的环形结构,可实现对光学性能优异的CdS受体(CD1 5.3 nm、CD2 4.9 nm)的顺序锚定。这种有序锚定既能促进能量转移,又可有效抑制ACQ现象。得益于SP1对受体分子的有序表面锚定能力,该系统可作为理想光捕获平台,实现从CD1到CD2再到曙红-5-异硫氰酸酯(EY)的两步连续高效能量传递,其 Φ_{ET} 分别达到84%与76%。CD1&CD2&EY在水相介质中对苯并噻唑与二苯基氧化膦的析氢反应表现出高效催化性能,光照12 h后产率达71%。

2 防伪

现代社会中信息加密和防伪十分重要,基于化学信息加密与防伪策略被广泛应用于防范解密和伪造,典型的技术包括基于荧光信息加密防伪、磷光信息加密防伪、热控型加密技术,以及湿度/电压可控

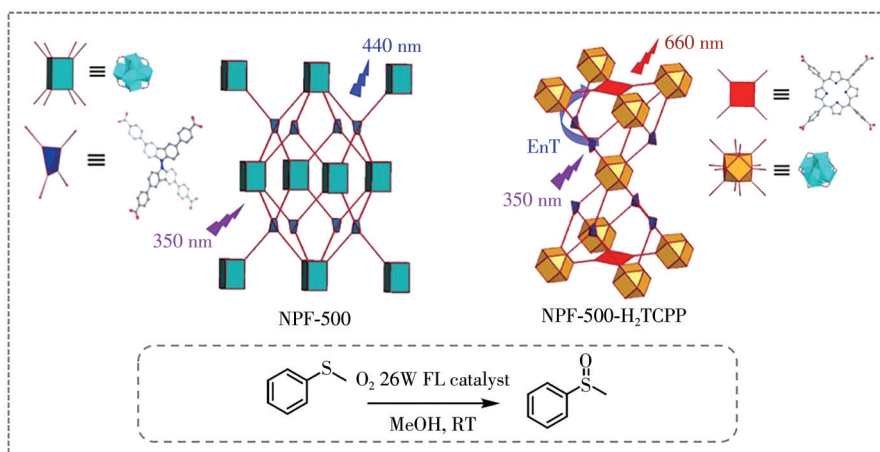


图4 NPF-500和NPF-500-H₂TCPP的能量传递过程及其作为催化剂的应用^[17]

Figure 4 The energy transfer processes of NPF-500 and NPF-500-H₂TCPP and their applications as catalysts^[17]

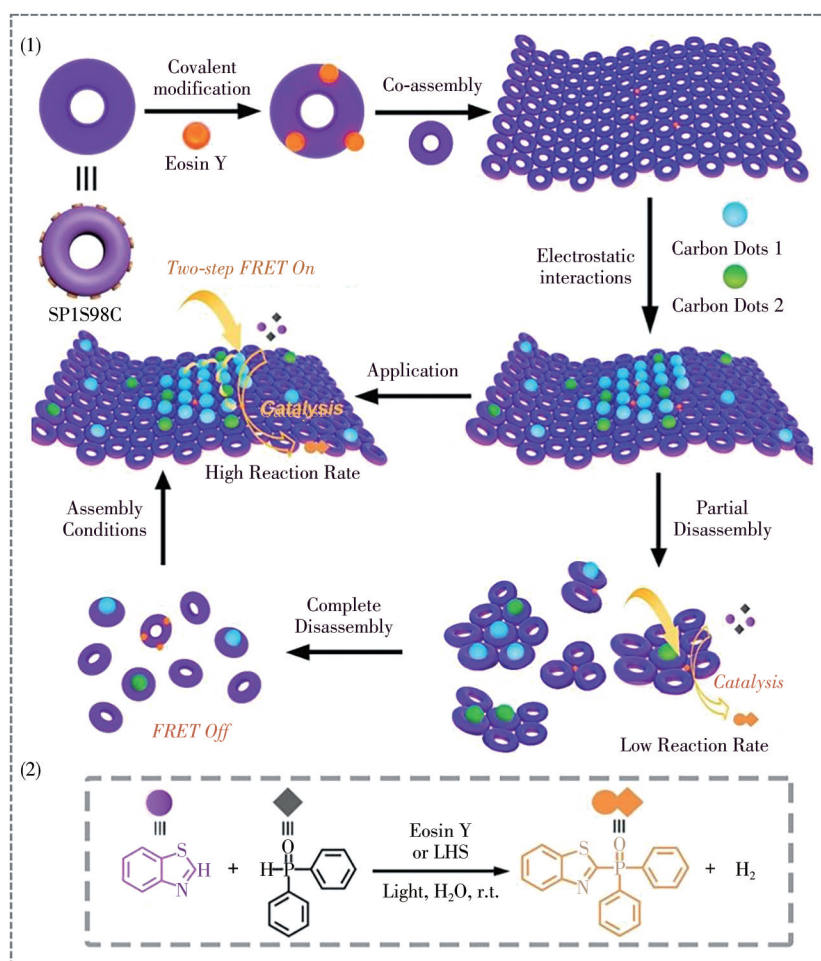


图5 (1)基于蛋白质纳米片的级联人工光捕获系统以及(2)其在苯并噻唑与二苯基膦的催化反应中的应用^[18]

Figure 5 (1) Cascade ALHS based on protein nanosheets and (2) its application for the catalytic reaction of benzothiazole with diphenylphosphine^[18]

型多层级信息加密与防伪系统。其中,基于可调荧光发射的加密防伪技术因其响应速度快、可视化和隐蔽性强而备受关注。因此,荧光可调材料在防伪印刷中受到极大的欢迎。通过改变供体和受体的比

例、距离、环境等因素,可以调节人工光捕获系统中的能量转移过程,从而实现对荧光发射强度和波长等光学特性的可控调节。这种动态可调性使得信息加密可以根据需要随时改变加密方式和加密强度,

增加了信息防伪的灵活性和时效性。

人工光捕获系统可以通过有序排列多个发色团实现宽光谱的高效吸收,并通过 Förster 共振能量转移过程将获得的能量转移到最终受体。我们通过引入苝合成离散的六方苝基有机铂(II)金属环(MPy1),并利用 ESY 作为初始能量供体(MPy1)和最终能量受体(SR 101)之间的中继体,构建了一例级联人工光捕获系统(图6)^[19]。苝是一种优良的荧光团,但在固态环境或高浓度条件下,由于苝共轭体系之间存在强烈的 π - π 相互作用,很容易受到 ACQ 的影响。光捕获平台 MPy1 的非平面构象阻碍了苝单元的 π - π 堆积,从而将苝衍生物的 ACQ 特性转化为 AIE 特性。MPy1 可将 ESY 和 SR101 依次封装在其疏水核心中,从 MPy1 到 ESY 和从 MPy1-ESY 到 SR101 的 Φ_{ET} 分别达到 17.4% 和 21.3%。基于 MPy1 的光捕获系统具有可调的荧光发射行为,使其成为信息加密应用的理想材料。使用 MPy1-ESY-SR101(200:2:1)体系在复印纸上打印的二维码(QR)在日光和紫外线下几乎看不到油墨,用四氢呋喃蒸气熏蒸 QR 维持 5 s 后,在 365 nm 紫外线下可观察到发光图案,并可用智能手机读取 QR 码信息,干燥后,数据信息被二次加密。该过程具有可逆特性,并为信息加密提供了便捷高效的技术手段。

此外,刘育教授团队基于水溶性柱[5]芳烃(WP5)、吡啶修饰四苯乙烯(Py-TPE)衍生物、磺基罗丹明 101(SR101)与磺化铝酞菁(AlPcS4)在水相中的非共价相互作用,设计了一例新型级联人工光捕获系统(图7)^[20]。得益于 Py-TPE 的 AIE 效应,WP5 通过其紧密有序的空间排布诱导 Py-TPE 聚集并产生聚集诱导发光增强效应(AIEE),使 Py-TPE/WP5 组装体成为优异的供体发色团。以 SR101 为能量受体时,第一步的 Φ_{ET} 与 AE 分别达 64% 和 13.0;随后引入 AlPcS4 作为第二受体,实现从 Py-TPE/WP5→SR101→AlPcS4 的两级连续能量转移(Φ_{ET} =84.2%,AE=11.6),荧光发射从蓝光区红移至近红外区,斯托克斯位移达 340 nm。基于此特性,该高效光捕获体系可用作荧光安全墨水。将预制溶液涂覆于滤纸,在自然光下无明显显色,而紫外光照下呈现显著荧光差异:当仅用 SR101 书写字母“N”时无显著发光,而使用 Py-TPE/WP5 溶液覆盖重写后则呈现红色发光。这项工作通过高效能量转移机制成功实现了数据加密与防伪功能。

基于相似策略,刘育教授通过寡聚亚苯基亚乙

烯基桥联柱[5]芳烃(H)、光致变色二芳基乙烯(G)与尼罗红(NiR)的自组装作用,成功开发了智能光响应仿生人工光捕获系统(图8)^[21]。H 与 G 首先形成小尺寸超分子组装体作为能量供体,在水相中进一步聚集成球形纳米粒子。所得纳米粒子可适配能量受体 NiR,形成基于 Förster 共振能量转移的仿生光捕获体系 G/H@NiR。该超分子体系不仅具有高的 Φ_{ET} 与 AE(Φ_{ET} =69%,AE=15.28),还具备光调控特性,通过改变能量供体(H在 G/H 组分中的占比)与受体(NiR)的比例,可实现青色、橙红与白色等可调谐光致发光。更为关键的是,当 G/H@NiR 纳米组装体暴露于不同光源时,G 作为调控单元可改变 H 与 NiR 之间的能量传递路径,实现包含白光发射的多色发光可逆切换过程。此外,该智能超分子组装体(G/H@NiR)可作为可擦写多色荧光墨水,填充至三维模型凹槽内形成高安全等级的全色域防伪 QR 码。该图形在 365 nm 紫外光下显影,经 254 nm 光刺激后可完全隐藏,展现出极佳的应用潜力。

Davoud Roustanavi 教授及其同事通过将第一代聚酰胺(PAMAM)树状大分子接枝到微晶纤维素(MCC)表面,并进一步通过 Michael 加成反应修饰香豆素基团,制备了一例荧光杂化树状大分子。随后,通过在水中物理掺入荧光素(FI),构建了一例基于 Förster 共振能量转移机制的人工光捕获系统(图9)^[22]。香豆素修饰的杂化树状大分子作为供体,荧光素作为受体,实现了有效的能量转移。实验结果表明,该人工光捕获系统在水溶液中表现出良好的离子和 pH 传感性能。通过调节荧光素的浓度,可以优化 Förster 共振能量转移效率。进一步的离子传感实验显示, Zn^{2+} 、 Al^{3+} 和 Cu^{2+} 等金属离子的存在会影响 Förster 共振能量转移的荧光特性,从而实现对不同离子的选择性检测。在实际应用中,该防伪墨水被成功用于丝绸和纸张的印刷和加密。通过在丝绸和纸张上施加含有不同浓度的 Al^{3+} 的墨水,可以观察到 Förster 共振能量转移效应的变化,从而验证了其在防伪领域的有效性。此外,该墨水还具有良好的可擦写性,可以在紫外光和可见光照下反复使用。

黄维教授团队开发了一种基于萘酰亚胺(NI)结构的新型碳点(CDs)材料,通过将 NI 单元引入碳点骨架并采用聚乙烯吡咯烷酮(PVP)包覆,成功实现了光致变色与有机余辉发光的协同效应(图10)^[23]。研究表明,NI 结构在光照下可原位生成阴离子自由

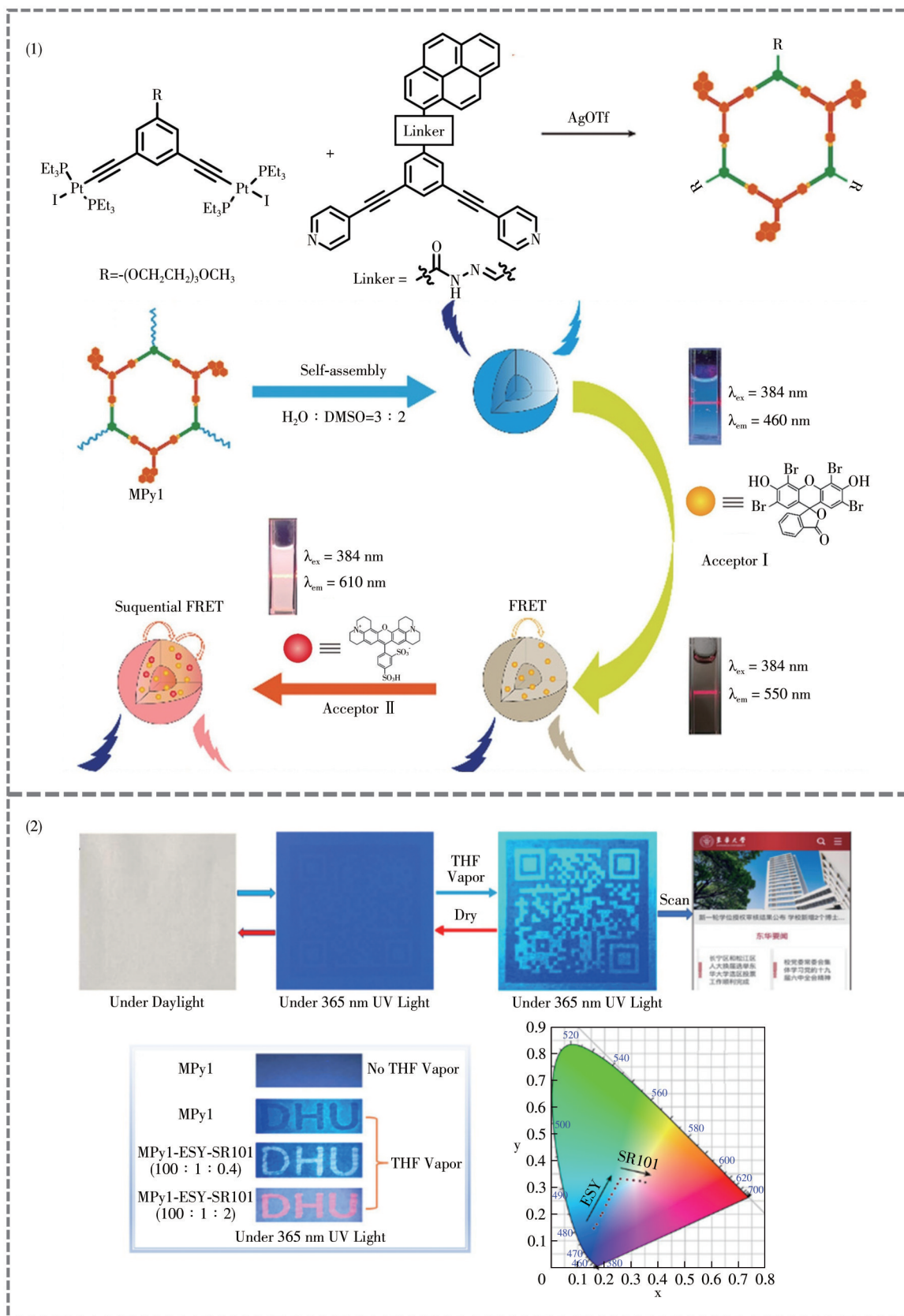


图6 (1)PtTPEM的合成路线和基于PtTPEM的人工光捕获系统顺序能量转移过程;(2)MPy1-ESY-SR101在防伪领域的应用^[19]

Figure 6 (1) Synthesis route of PtTPEM and sequential energy transfer process of ALHS based on PtTPEM; (2) Application of MPy1-ESY-SR101 in anti-counterfeiting field^[19]

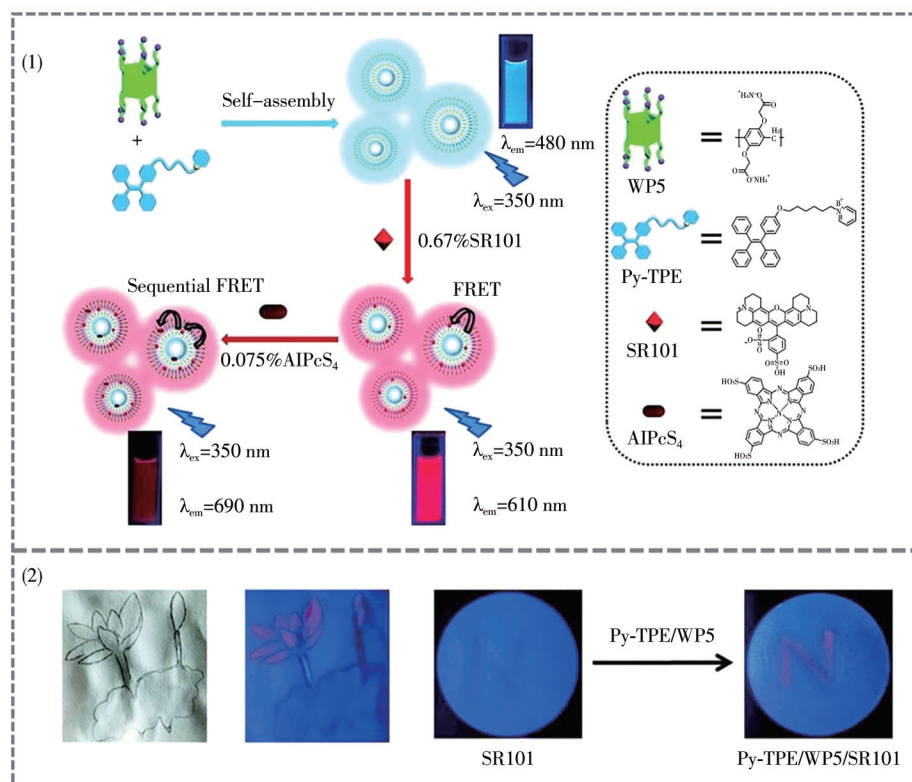


图7 (1)在水溶液中构建具有顺序能量转移的光捕获系统及其(2)防伪应用^[20]

Figure 7 (1) Construction of a light-harvesting system with sequential energy transfer in aqueous solution and (2) its application for anti-counterfeiting^[20]

基,赋予碳点动态光致变色特性,其吸收光谱随紫外线照射时间延长逐渐红移,材料外观颜色从无色转变为棕色。通过Förster共振能量转移机制,未激活的碳点与光活化后的自由基之间发生能量转移,显著增强了余辉的发光性能,余辉寿命长达253 ms,量子产率达7.3%。值得注意的是,CDs-PVP薄膜不仅表现出从无色到棕色的可逆外观颜色变化以及稳态光致发光(SSPL)颜色从蓝色到黄色的动态迁移,还展现出对光、水、温度的刺激响应行为,这些外界刺激能显著调控其光致变色与光致发光(PL)特性。基于上述特点,研究团队构建了一种智能防伪体系,利用UV光照时间编码实现安全自拍与分级数据加密,并通过碳点阵列的突触行为模拟人工智能图像识别,成功从噪声信号中提取目标图案。该工作不仅为多功能碳点材料的设计提供了新策略,还为光响应材料在信息安全、人工神经网络等领域的应用开辟了新的方向。

3 检测

人工光捕获系统通过创新性纳米材料的设计与结构优化,实现了荧光信号的高效放大与精准调控,

其核心机制在于构建级联能量转移体系,利用供体-受体间的Förster共振能量转移效应,将低强度荧光信号转化为高强度荧光信号。当人工光捕获系统用作荧光探针时,能量供体和受体荧光强度的差异程度便于构建具有大斯托克斯位移的比率型荧光探针。大斯托克斯位移能有效分离发射光与激发光信号,从而消除背景自发荧光的干扰并提升检测灵敏度。因此,基于其优异的荧光信号放大、大斯托克斯位移特性及良好的检测灵敏度,人工光捕获系统有望在荧光传感领域获得应用。

借助于人工光捕获系统具有大斯托克斯位移的优势,我们设计合成了具有AIE活性的铂金属环MPt1,该材料在水溶液中因AIE效应荧光强度显著增强,可作为良好的能量供给平台。选取疏水性染料ESY和SR101分别作为第一受体和第二受体,构建了一例具有连续两步能量转移功能的人工光捕获系统(图11)^[24]。MPt1可将ESY和SR101依次包裹在MPt1中,从MPt1到ESY和从MPt1-ESY到SR101的 Φ_{ET} 分别达到54.82%和56.59%。所制备的MPt1-ESY-SR101探针对生物硫醇(半胱氨酸(Cys)、同型半胱氨酸(Hcy)和谷胱甘肽(GSH))表现出高灵

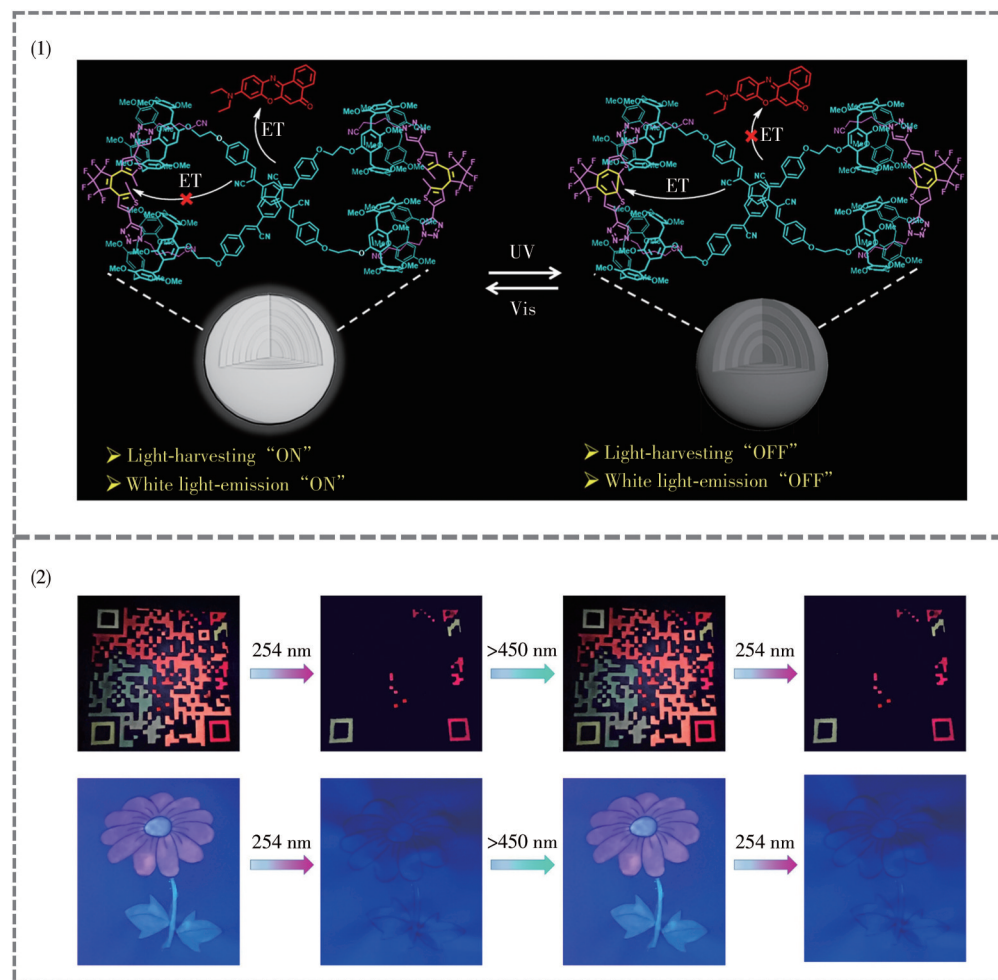


图8 (1)基于G/H@NiR构建的智能光响应仿生人工光捕获系统及其(2)防伪应用^[21]

Figure 8 (1) Intelligent light-responsive bionic ALHS constructed based on G/H@NiR and (2) its application in anti-counterfeiting field^[21]

敏度和特异性检测性能。在生物硫醇存在下,探针溶液从橙色变为黄色,且在606 nm处荧光强度显著降低。更值得注意的是,该探针对生物硫醇表现出极低的检测限,对Cys、GSH和Hcy的LOD值分别为 3.09×10^{-8} mol/L、 5.02×10^{-8} mol/L和 5.05×10^{-8} mol/L。当应用于实际人血清样本检测时,冠心病(CHD)患者血清总生物硫醇水平较健康人群呈上升趋势,表明总生物硫醇可能成为心血管疾病的潜在生物标志物或预测指标。因此,基于人工光捕获系统的该探针凭借其卓越性能,在疾病筛查领域展现出广阔应用前景。

天线效应能够有效放大人工光捕获系统中能量受体的荧光信号,即使目标物质浓度极低时仍能显著提升检测的灵敏度。我们基于AIE效应的铂金属环(TPEMc)与罗丹明衍生物(P1/P2/P3)构建了一例人工光捕获系统,并成功实现了对水环境中胂(N_2H_4)的高灵敏度比率型荧光检测(图12)^[25]。该

研究通过静电作用将带负电荷的罗丹明受体(P1/P2/P3)组装到带正电的TPEMc纳米颗粒表面,形成稳定的能量转移体系。在 N_2H_4 存在下,罗丹明酯键选择性断裂释放荧光母体,激活Förster共振能量转移过程,引起溶液荧光颜色从青色到黄色的显著转变,同时伴随550 nm处荧光强度增强及500 nm处供体荧光发生猝灭。实验表明,TPEMc-P1体系对 N_2H_4 的检测表现出最优性能,其 Φ_{ET} 达到58.89%,AE为2.20,LOD低至32.4 nmol/L,较单一罗丹明探针降低两个数量级。结合智能手机RGB分析技术,该体系可实现对实际水样中 N_2H_4 的快速可视化筛查,线性检测范围为0~160 μ mol/L。值得注意的是,TPEMc-P1探针对 Fe^{3+} 、氨基酸等潜在干扰物展现出良好的抗干扰能力,且响应时间仅需8 min。该方法凭借高信噪比、便携性强和低成本优势,为环境水体中 N_2H_4 污染的实时监测提供了创新解决方案,展现出在公共卫生安全领域的应用潜力。

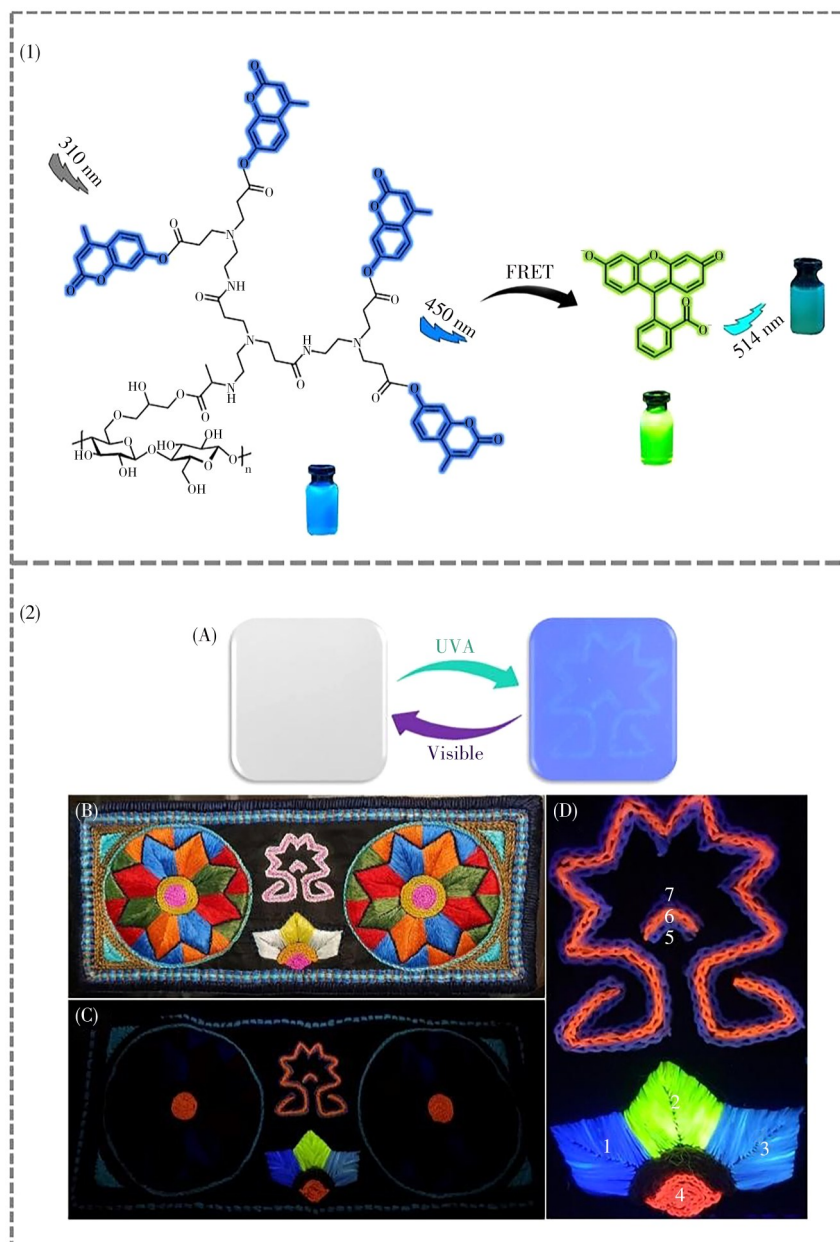


图9 (1) 荧光MCC-Co和FI的分子结构及其Förster共振能量转移机制; (2) MCC-Co/FI在智能防伪油墨中的应用^[22]

Figure 9 (1) Molecular structure of fluorescent MCC-Co and FI and their FRET mechanism; (2) application of MCC-Co/FI in smart anti-counterfeit inks^[22]

此外,James团队通过静电相互作用在水环境中成功构建了基于碳点(CDs)和四苯基卟啉对甲苯磺酸盐(TMPyP)的超分子人工光捕获系统(图13)^[26]。由于CDs的发射光谱与TMPyP的吸收光谱高度重叠,体系实现了从CDs到TMPyP的高效Förster共振能量转移过程。当TMPyP加入CDs水溶液时,通过自组装形成稳定的超分子纳米颗粒,在供体/受体比为1 000:1时, Φ_{ET} 与AE分别达到38%和14.1。更为有趣的是,该人工光捕获系统对 Hg^{2+} 表现出高度的选择性,当 Hg^{2+} 存在时,由于TMPyP与 Hg^{2+}

的络合作用,引发反向Förster共振能量转移效应,导致TMPyP在700 nm处的荧光猝灭和CDs在480 nm处的荧光恢复,并伴随溶液从棕色到绿色的变化,LOD低至 6.2×10^{-7} mol/L。而当在溶液中加入其他金属离子 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 Mn^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Zn^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Cu^{2+} 、 Co^{2+} 和 K^{+} 时,溶液荧光强度均未发生明显变化,表明该探针对 Hg^{2+} 表现出优异的选择性。进一步将CDs-TMPyP整合到水凝胶和纤维素膜中,开发出具有双功能(检测/吸附)的传感平台。实验表明,该复合材料在pH=5.0条件下对

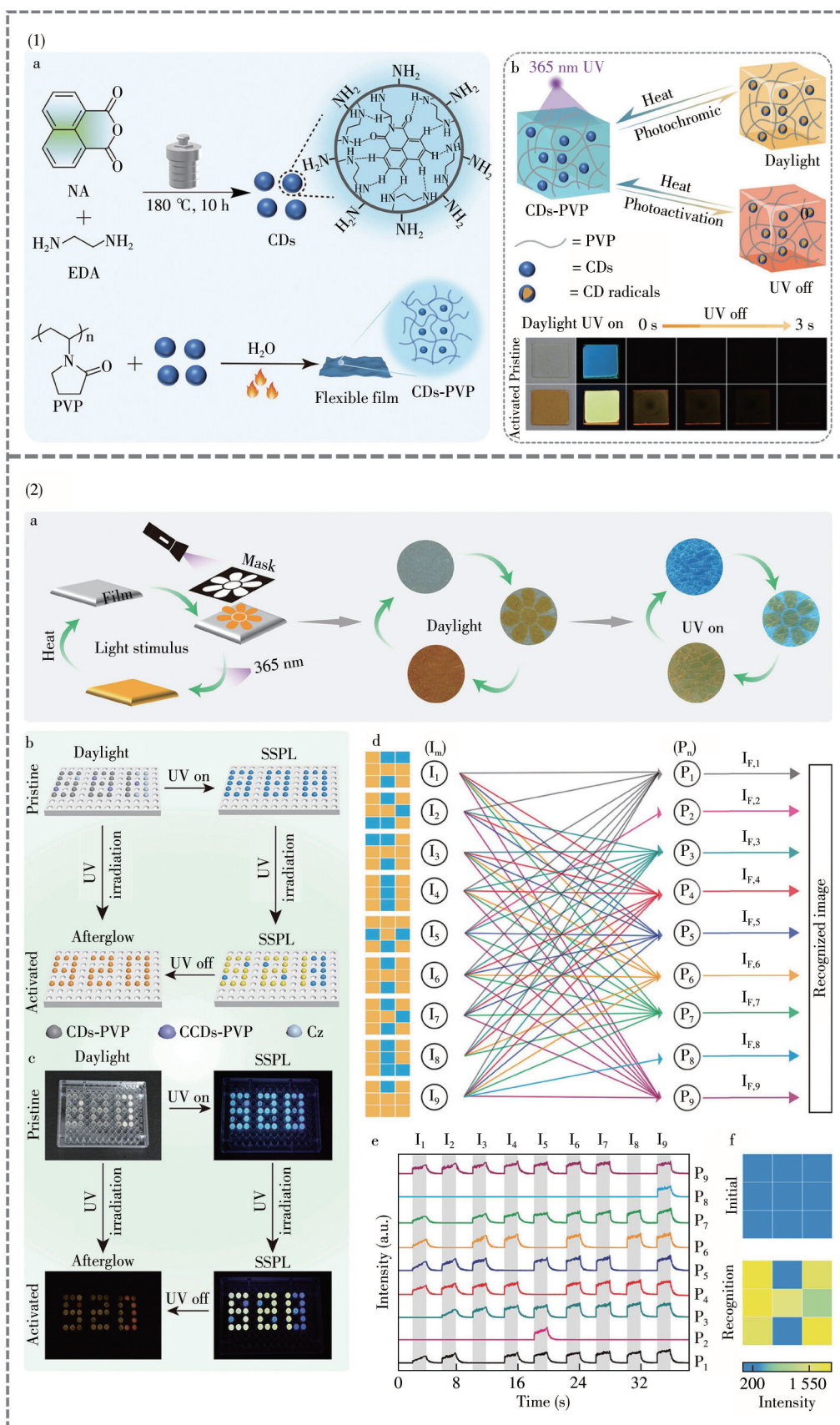


图 10 (1)光致变色余辉 CDs-PVP 薄膜的制备及其(2)在安全信息传输、数据加密与突触成像识别中的应用^[23]
 Figure 10 (1) Preparation of photochromic afterglow CDs-PVP and (2) its application in secure information transmission, data encryption, and synaptic imaging recognition^[23]

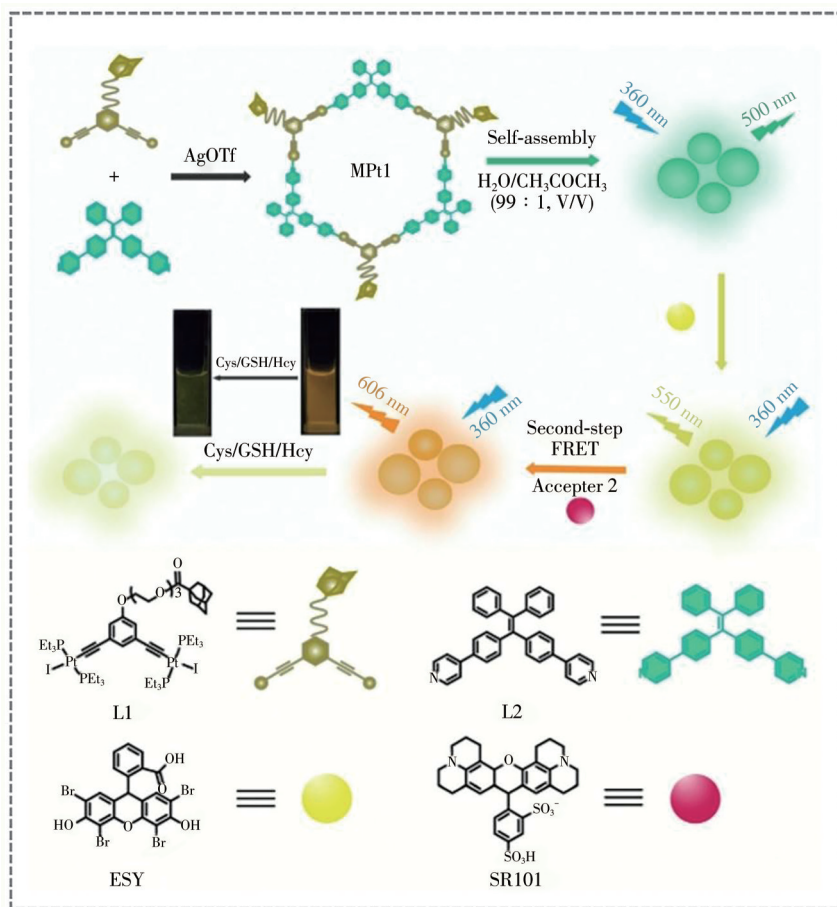


图 11 MPt1-ESY-SR101 的合成路线、级联能量转移过程和对 Cys、GSH 和 Hcy 的传感^[24]

Figure 11 Synthetic route, cascade energy transfer process and sensing of Cys, GSH and Hcy in MPt1-ESY-SR101^[24]

Hg^{2+} 的最大吸附量可达 124.6 mg/g。该方法结合了比率荧光传感与吸附功能,为环境水体中重金属污染的可视化监测与原位修复提供了新思路。研究证实,基于静电自组装的人工光捕获系统在复杂水环境中兼具高灵敏传感与材料功能化的双重优势,展现出在环境分析领域的广阔应用前景。

卢小泉教授及其同事报道了一例基于二氧化锰(MnO_2)纳米球与纳米片协同作用的人工光捕获系统,用于谷胱甘肽(GSH)的“开关式”检测(图 14)^[27]。他们通过超声剥离法制备了 MnO_2 纳米片,并利用半胱氨酸(Cys)辅助构建了具有增强荧光的 Cys- MnO_2 纳米球。在该体系中,Cys- MnO_2 纳米球作为能量供体, MnO_2 纳米片同时充当能量受体与识别单元。由于 MnO_2 纳米片对 Cys- MnO_2 纳米球具有荧光猝灭效应,初始状态下体系呈现“关闭”状态;当加入 GSH 时,其与 MnO_2 发生氧化还原反应生成 Mn^{2+} ,破坏了 Förster 共振能量转移过程,致使 Cys- MnO_2 荧光恢复(“开启”状态)。实验结果表明,该传感器在 5~50 $\mu\text{mol/L}$ 和 150~800 $\mu\text{mol/L}$ 范围内

对 GSH 呈现良好线性响应,LOD 低至 2.96 $\mu\text{mol/L}$,并表现出优异的选择性,可有效区分 GSH 与其他含巯基物质。此外,该方法在血清样本中展现出高回收率(92.63%—111.35%),证实了其生物医学应用的潜力。该工作通过纳米材料结构设计与氧化还原调控的结合,为复杂生物体系中 GSH 的高灵敏检测提供了一种新的思路。

4 生物医学

基于 Förster 共振能量转移机制的人工光捕获系统在生物医学领域展现出独特优势。通过模拟天然光合作用的能量传递网络,人工光捕获系统利用供体-受体分子间的定向能量转移实现高效光能转化,其灵敏度较传统荧光标记提升 1—2 个数量级,可精准检测活细胞内微环境动态变化。相较于单一荧光探针,人工光捕获系统能够实现多模态成像与原位诊断,其能量传递效率显著增强了信号强度,在抗菌和细胞成像领域展现出优异的性能。此外,人工光捕获系统的可编程性使其能通过分子工程适配

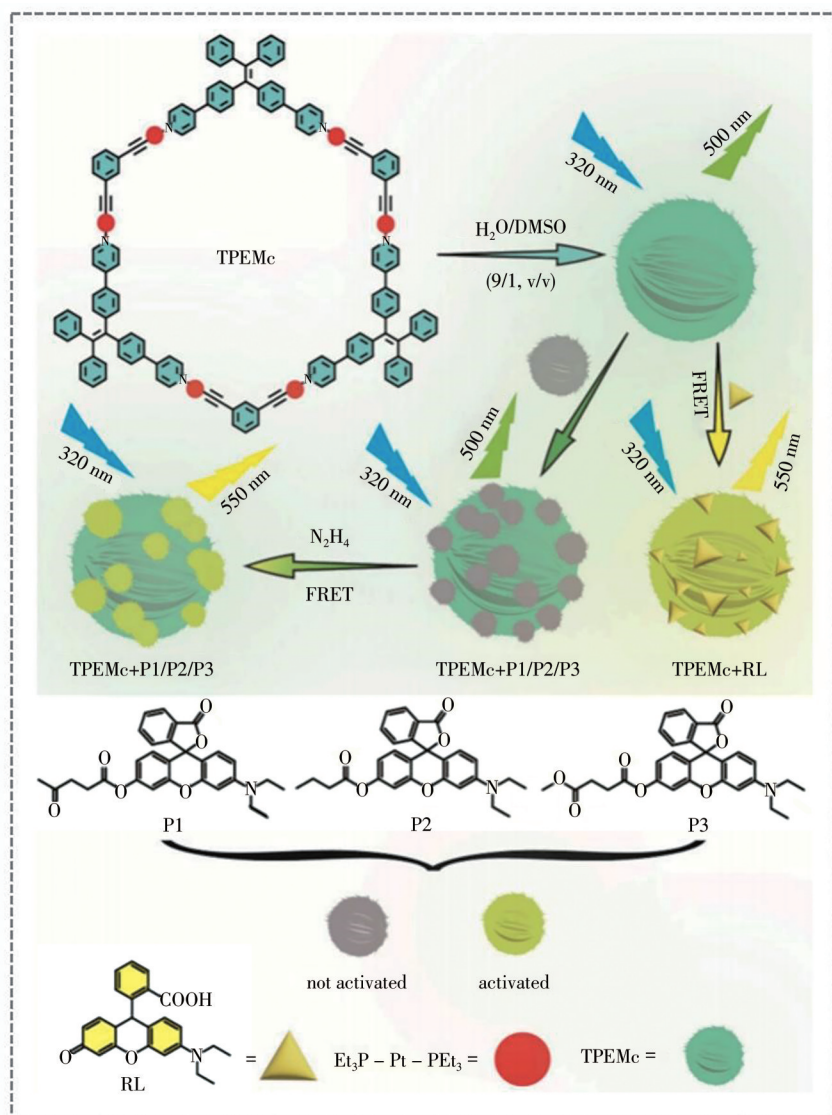


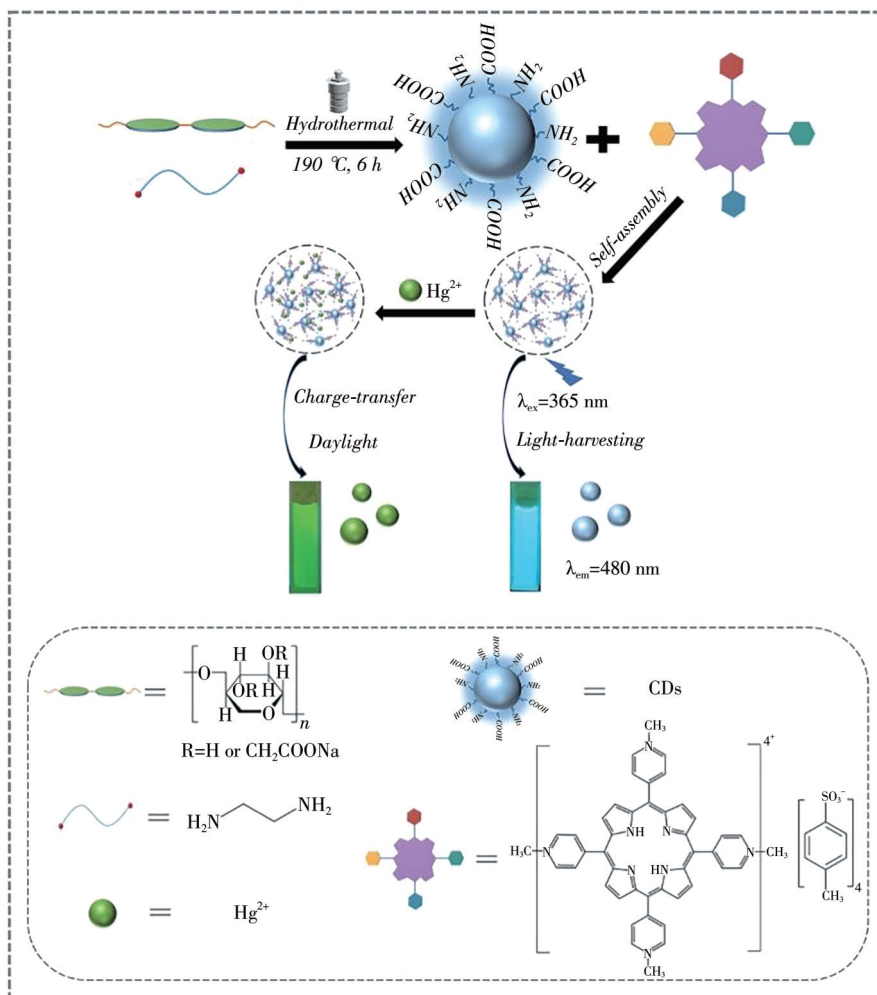
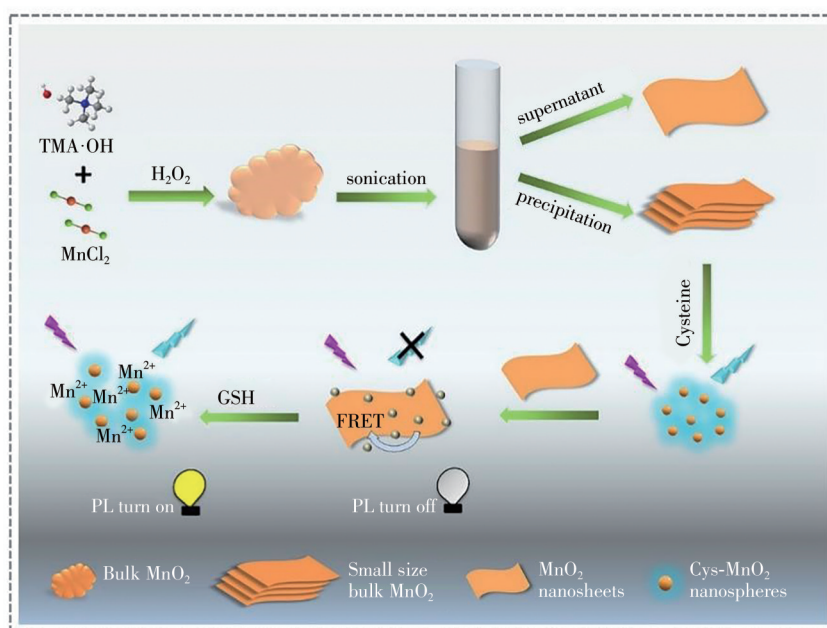
图 12 基于 TPMEc-P1 的光捕获体系构筑及其对 N_2H_4 的响应过程^[25]

Figure 12 Construction of ALHS based on TPMEc-P1 and its response process to N_2H_4 ^[25]

不同靶标,结合低光毒性特征,在活体深层组织成像与精准诊疗中具有临床转化潜力,为开发下一代智能生物传感与治疗平台提供了创新范例。

我们报道了一例基于铂(II)金属环与级联能量传递策略的新型近红外发光的人工光捕获系统,用于增强抗菌效率并降低暗毒性。我们和其他研究者们证明了基于四苯乙烯(TPE)的铂(II)金属环可作为光捕获系统中的理想天线。配体 L1 与配体 L2 在三氟甲磺酸银催化下通过配位驱动自组装形成六元铂(II)金属环 PtTPEM。PtTPEM 表现出优异的 AIE 特性和稳定性,是理想的光捕获平台。通过静电相互作用依次将 SR101 和二氢卟吩 e6(Ce6)负载到 PtTPEM 自组装体中,实现了两步顺序能量转移(图 15)^[28]。当 PtTPEM/SR101 比例为 20:1 时, Φ_{ET}

和 AE 分别为 76.9% 和 41.11;当 PtTPEM/SR101/Ce6 比例调整为 20:1:2 时, Φ_{ET} 和 AE 分别提升至 91.3% 和 44.13。此外,SR101 和 Ce6 在 PtTPEM-SR101 周围实现均匀分散,这不仅防止了染料在水介质中的自猝灭,还促进了能量从供体到受体的传递。Ce6 在纳米球中的均匀分散显著降低了其在生理环境中的自发聚集,提高了单线态氧($^1O_2$)的产率及抗菌活性。在白光照下,该体系通过光敏剂 Ce6 高效产生单线态氧($^1O_2$),显著提升了抗菌性能。实验表明, PtTPEM-SR101-Ce6 在 2 $\mu mol/L$ 浓度下对金黄色葡萄球菌的灭菌率接近 100%,较单一 PtTPEM 或 Ce6 处理组提升超过 20 倍,且对革兰氏阴性菌大肠杆菌的灭菌率也达到 95%。通过扫描电镜观察发现,光照后细菌细胞膜出现明显破损,证

图 13 CDs-TMPyP 的构筑及其对 Hg^{2+} 的检测应用^[26]Figure 13 Construction of CDs-TMPyP and its application on detection of Hg^{2+} ^[26]图 14 基于 Förster 共振能量转移的 GSH 传感平台的制备和原理^[27]Figure 14 Preparation and principle of FRET-based GSH sensing platform^[27]

实了 $^1\text{O}_2$ 介导的膜损伤机制。该研究通过金属环的AIE特性与级联能量传递设计,解决了传统光敏剂

易聚集猝灭的难题,为开发高效低毒的光动力抗菌材料提供了新思路。

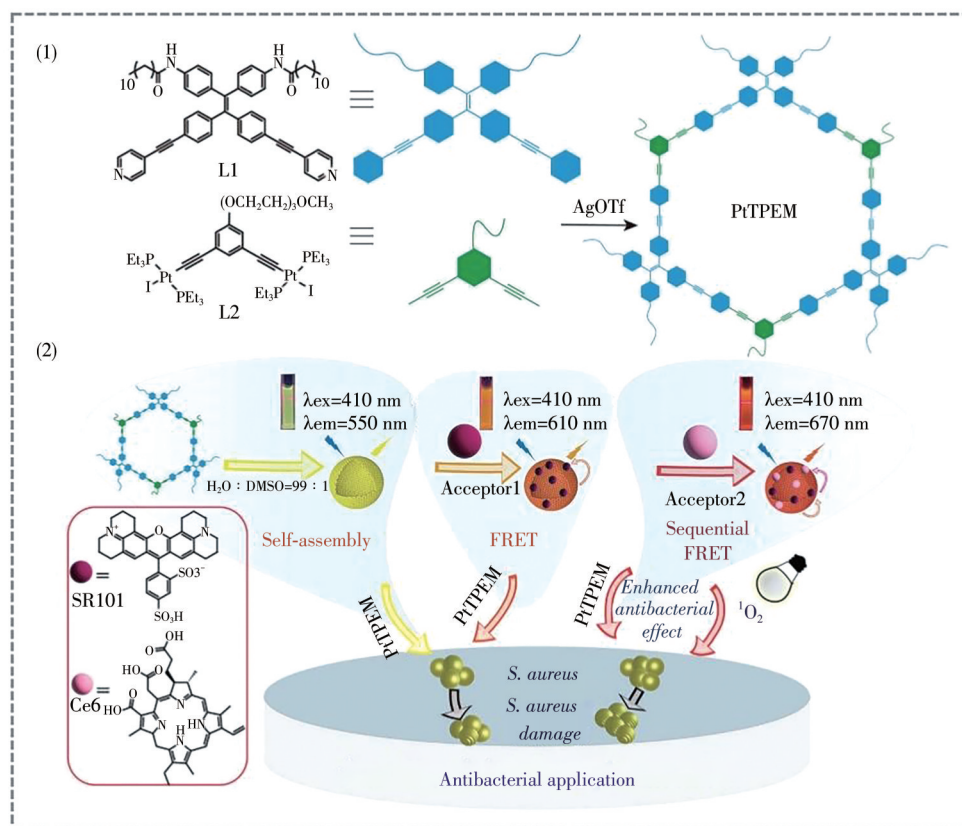


图15 (1)PtTPEM的合成路线;(2)基于PtTPEM的人工光捕获系统的构筑及其在抗菌领域的应用^[28]

Figure 15 (1) Synthesis route of PtTPEM; (2) construction of PtTPEM-based ALHS and its application in antimicrobial field^[28]

大环化合物如扭曲葫芦[15]脲(tQ[15])和葫芦[10]脲(Q[10])凭借其刚性疏水空腔和稳定的构型,能够有效抑制荧光分子激发态的非辐射弛豫衰减,并防止其在水环境中猝灭,从而显著拓展了AIE超分子聚合物的应用范围,尤其在生物医学领域展现出巨大潜力。基于此,肖昕教授团队通过主-客体识别与 π - π 堆积作用,采用两步组装策略构建了线性超分子聚合物APy@tQ[15]@Q[10](图16)^[29]。首先利用tQ[15]的疏水空腔与9,10-二(4-吡啶基)蒽(APy)衍生物的吡啶基团形成2:1的主-客体复合物,随后通过Q[10]与APy蒽环部分的 π - π 相互作用构建三维超分子聚合物链。该组装过程伴随显著的荧光增强现象,荧光颜色从初始的淡黄色逐渐转变为绿色到最后的亮黄色,表明AIE效应被成功激活。当以罗丹明B(RB)为能量受体,供体/受体摩尔比为200:1时,该体系的 Φ_{ET} 和AE分别为41.37%和17.65,并成功将体系的发射波长拓展至589 nm。得益于其卓越的天线效应和高能量传递效率,APy@tQ[15]@Q[10]-RhB体系可作为新型多色细

胞标记探针。实验表明,经APy@tQ[15]@Q[10]孵育的HeLa细胞仅在绿色通道观察到细胞核信号,而结合RhB后,红色通道同时显现细胞核与细胞质的双重荧光信号。值得注意的是,该体系在80 $\mu\text{mol/L}$ 浓度下对HeLa细胞存活率仍保持94%以上,展现出良好的生物相容性。这不仅证实了Förster共振能量转移过程在活细胞内的成功实现,更表明该组装体的染色范围可从单纯核定位扩展到胞质共染,为多维度细胞成像提供了新工具。

由于近红外受体的选择有限,构建可用于生物应用的具有近红外(NIR)发射(650~900 nm)的人工光捕获系统仍然是一项挑战。李泉教授及其同事报告了一种基于磺化硫杂杯[4]芳烃(SC4AD)和蔡基-1,8-二苯基吡啶鎓衍生物(NPS)的超分子自组装技术用于构建人工光捕获系统(图17)^[30]。通过简单混合策略实现NPS与SC4AD的静电-疏水协同组装,形成平均粒径约130 nm的纳米颗粒。NPS在组装后因聚集诱导发光增强(AIEE)效应,荧光强度提升48.7倍,量子产率从0.99%增至14.46%,

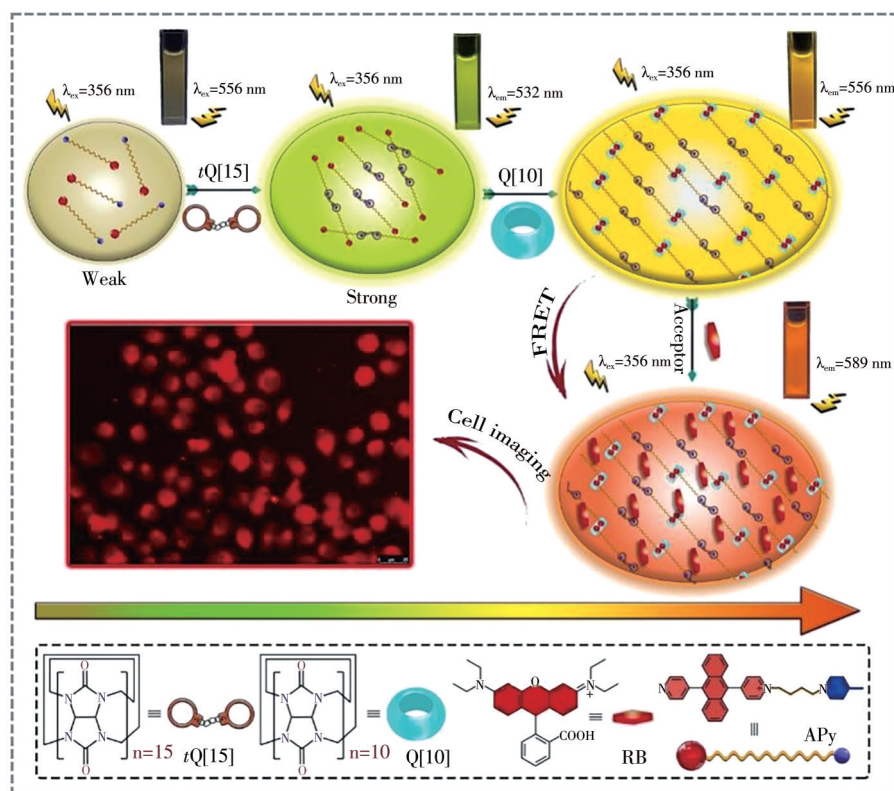


图 16 基于 APy@tQ[15]@Q[10] 的水溶性人工光捕获系统的自组装过程^[29]

Figure 16 Self-assembly process of water-soluble ALHS based on APy@tQ[15]@Q[10]^[29]

发射峰从 593 nm 蓝移至 550 nm。在 NPS-SC4AD 体系中引入尼罗蓝(NiB)作为受体,构筑了一例红外外发射(675 nm)的人工光捕获系统。值得注意的是,当供体/受体比为 333:1 时,NPS-SC4AD-NiB 的 Φ_{ET} 为 50.4%,AE 为 32.9。更有趣的是,当供体/受体比为 250:1 时,NPS-SC4AD-NiB 在 PBS 缓冲溶液中实现了更高的能量传递效率(Φ_{ET} =60.8%,AE=33.1)。由于 NPS-SC4AD-NiB 体系在 PBS 缓冲溶液中具有出色的能量转移效率,他们在活细胞中对人工光捕获系统进行了进一步探索。细胞实验表明,NPS-SC4AD-NiB 纳米颗粒通过内吞作用进入 PC-3 细胞后,在 405 nm 激发下呈现显著的 NIR 发射,且与高尔基体染色试剂 NBD C₆-神经酰胺共定位,证实其对高尔基体的靶向成像能力。该研究创新性地利用大环主体调控组装过程,避免了传统共价修饰的复杂性,为开发多功能近红外光捕获系统及亚细胞器成像提供了新策略。

迄今为止,利用 Förster 共振能量转移构建人工光捕获系统用于细胞成像的研究已陆续报道,但通过磷光能量转移系统实现细胞成像仍面临巨大挑战。刘育教授及其同事通过主-客体识别机制,利用溴萘连接的甲氧基苯基吡啶盐(G)与葫芦[8]脲(CB[8])

形成 1:1 异质二聚体复合物 G $\subset$ CB[8],其分子内电荷转移(ICT)效应诱导磷光发射(530 nm),量子产率达 4.14%。进一步引入两亲性杯芳烃(SC4AH),通过疏水作用与静电相互作用形成三元组装体 G $\subset$ CB[8]@SC4AH,其磷光寿命延长至 430.3 μ s,总发光量子产率提升至 17.82%。在三元组装体 G $\subset$ CB[8]@SC4AH 中分别引入两种有机染料尼罗红(NiR)和尼罗蓝(NiB)作为能量受体,构建了两例具有超高能量转移效率(Φ_{ET} 值分别为 64.1% 和 49.6%,AE 值分别为 352.9 和 123.5)的磷光捕获体系,且在高供体/受体比例(150:1,300:1)下仍保持优异性能(图 18)^[31]。与 G $\subset$ CB[8]@SC4AH/NiR 体系相比,G $\subset$ CB[8]@SC4AH/NiB 在 675 nm 处展现出显著延迟的近红外发射特性,并成功应用于 A549 癌细胞的近红外溶酶体靶向成像。实验观察到 650~700 nm 范围内的明亮近红外发射,而游离 NiB 在 405 nm 激光激发下仅呈现微弱发光,证实了该体系从 G $\subset$ CB[8]@SC4AH 到 NiB 的磷光能量转移过程及活体成像能力。该研究通过超分子组装策略整合能量转移与靶向递送功能,为开发高灵敏、深组织穿透的活体成像探针提供了新思路,同时为构建智能响应型超分子诊疗体系奠定了基础。

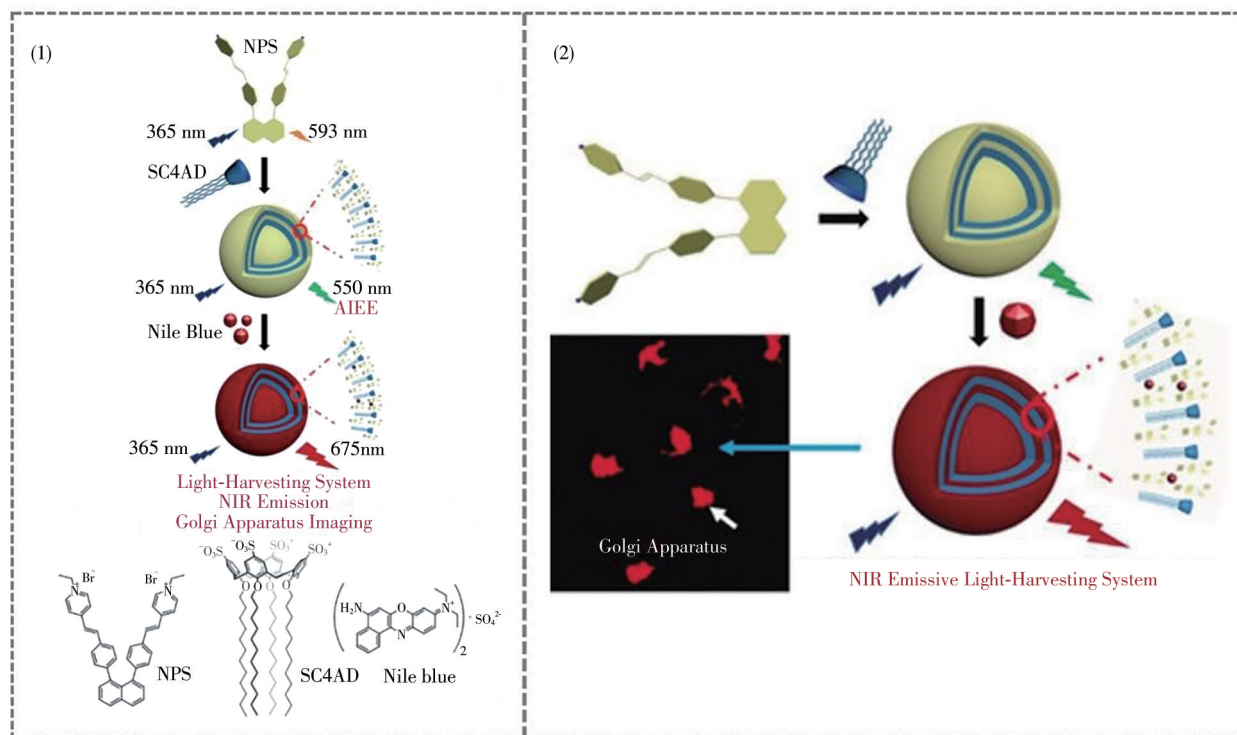


图 17 (1) NPS-SC4AD-NiB 纳米粒子的自组装过程;(2) NPS-SC4AD-NiB 应用于 PC-3 细胞成像^[30]

Figure 17 (1) Self-assembly process of NPS-SC4AD-NiB nanoparticles; (2) NPS-SC4AD-NiB applied to PC-3 cell imaging^[30]

此外,陈春龙教授团队报道了一例基于序列定义拟肽纳米管(PNTs)构建的高效人工光捕获系统,通过模拟自然光合作用系统的层级结构,实现了在水相介质中高达 98.6% 的能量转移效率。他们通过精确调控拟肽序列(Pep-DNS 和 Pep-CD)的自组装行为,制备出具有高结晶度的圆柱形纳米管结构。进一步研究证明,纳米管表面的 β -环糊精(CD)基团可通过主-客体相互作用高效负载罗丹明 B (RhB)受体分子,构建出具有宽光谱可调特性的人工光捕获系统(图 19)^[32]。时间分辨荧光光谱分析显示,随着受体浓度的增加,供体荧光寿命从 12.7 ns 显著缩短至 2.8 ns,证实了能量通过 Förster 共振能量转移机制快速转移至受体,其 Φ_{ET} 和 AE 分别为 98.6% 和 29.9。值得注意的是,该体系在活细胞成像中表现出优异的生物相容性,通过内吞作用定位于溶酶体,成功实现了对肺癌细胞 miR-210 的灵敏检测。通过对不同 miRNA 转染细胞的对比分析,建立了荧光强度比与靶标浓度的线性关系,检测限低至 1.3 拷贝/细胞,为癌症标志物的精准检测提供了新工具。该研究通过创新性地结合拟肽自组装技术和分子识别机制,突破了传统光捕获系统在供体密度、能量传递效率及生物应用方面的局限,为开发多功能生物传感器和智能诊疗体系开辟了新途径。

5 总结与展望

近年来,基于 Förster 共振能量转移机制的人工光捕获系统通过供体-受体分子的光谱匹配与空间排布,构建了高效的光能捕获与定向传递网络,量子效率突破 80%,展现出在催化、防伪、检测及生物学等领域应用的巨大潜力。其核心优势主要体现在以下三个方面:①通过超分子自组装或主-客体识别实现纳米级精密调控,突破了传统荧光团的聚集猝灭限制。②借助分级组装或能量中继策略显著提升能量利用效率。③通过外部刺激(如光、化学信号)实现能量传递路径的实时调控。这些特性为能源转化、检测、信息加密及精准诊疗提供了新范式。

然而,人工光捕获系统的性能仍受限于能量传递效率、受体选择范围及生物相容性等瓶颈。未来研究需要在材料设计、机制优化及跨学科融合方面取得突破。如在材料创新层面,亟需开发兼具强吸光能力与窄发射峰的近红外受体(如稀土配合物、量子点或新型共轭聚合物),并探索动态光谱匹配技术以实现供体-受体光谱的“按需适配”。同时,借鉴生物膜蛋白的精细结构,通过共价键合或超分子锁机制固定供体-受体构型,结合“能量中继站”构建多级传递网络,有望抑制受体自猝灭并突破传统 Förster

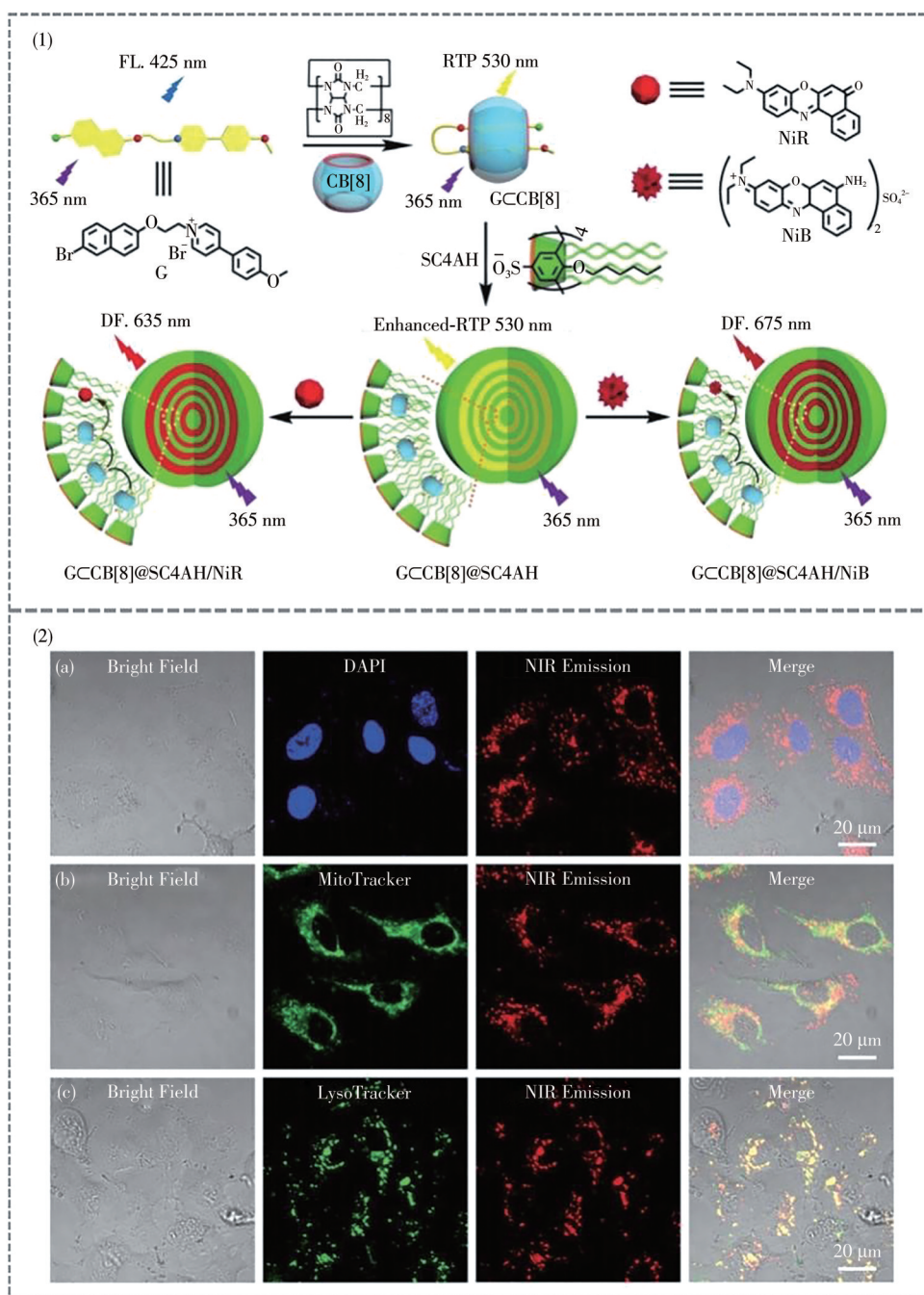


图 18 (1) $G\text{-CB}[8]@SC4AH/NiR$ 和 $G\text{-CB}[8]@SC4AH/NiB$ 的构筑; (2) $G\text{-CB}[8]@SC4AH/NiB$ 应用于细胞中溶酶体成像^[31]

Figure 18 (1) Construction of $G\text{-CB}[8]@SC4AH/NiR$ and $G\text{-CB}[8]@SC4AH/NiB$; (2) application of $G\text{-CB}[8]@SC4AH/NiB$ for imaging lysosomes in cells^[31]

共振能量转移的距离限制。在功能集成方面,人工光捕获系统需向诊疗一体化平台演进,例如通过机器学习优化能量传递参数,或将光动力治疗与化疗药物协同递送,利用 Förster 共振能量转移提供疗效反馈。生物医学应用方面,需解决近红外二区发射材料匮乏、长期毒性及精准递送难题,同时探索仿生修饰策略以增强肿瘤靶向性。

总之,人工光捕获系统作为连接光子科学与分子工程的桥梁,正从基础研究迈向实际应用的关键阶段。通过材料创新、机制突破与跨学科协作,人工光捕获系统有望在能源、医疗、信息等领域引发颠覆性变革。未来研究需以“高效能、高智能、高生物相容性”为核心导向,推动人工光捕获系统从实验室原型走向工业化应用,最终实现“人工光合作用”的终极愿

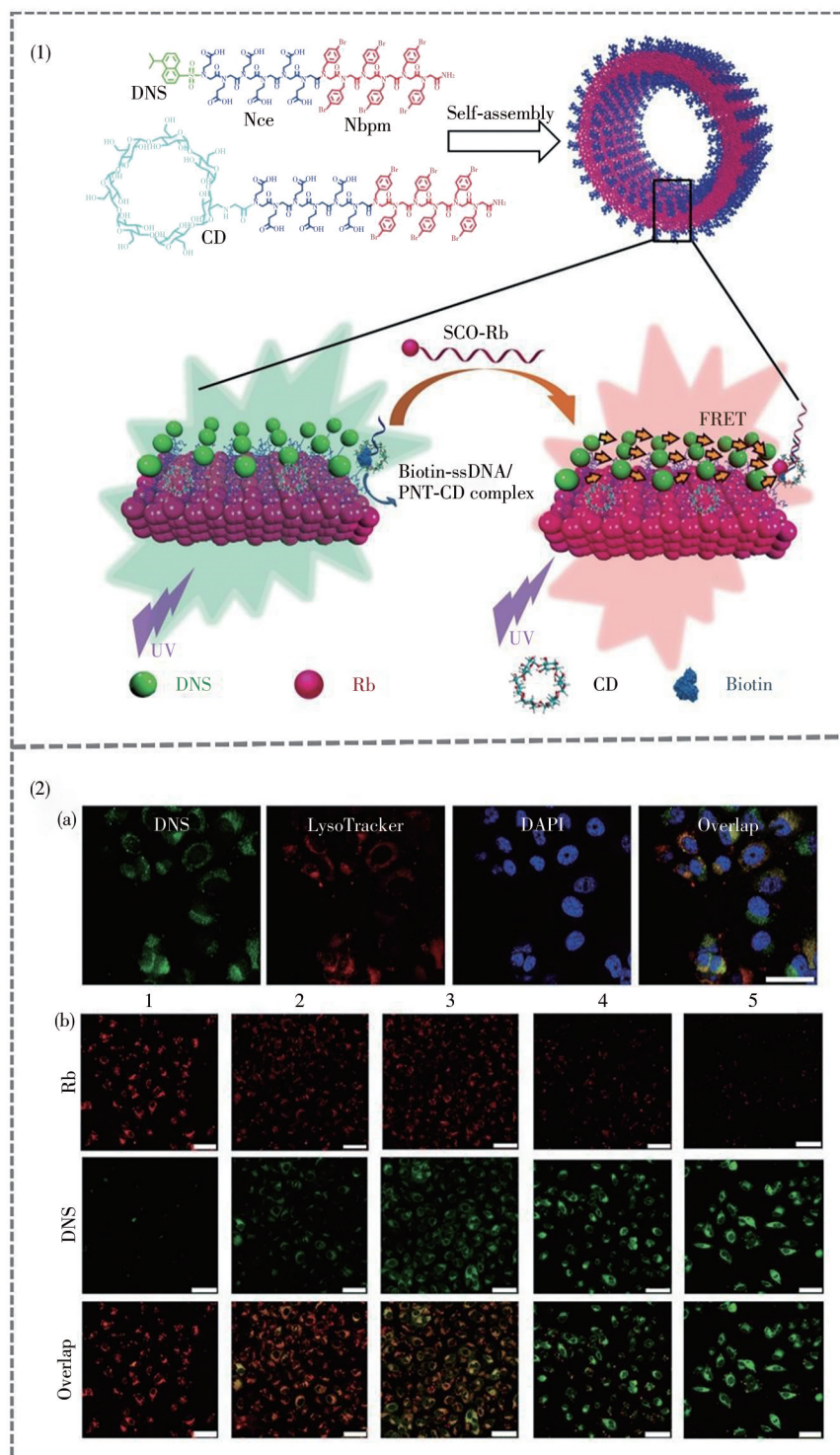


图 19 (1) 自组装拟肽纳米管的构筑;(2) 基于自组装拟肽纳米管的活细胞 miR-210 检测系统(比例尺: 50 μm)^[32]

Figure 19 (1) Construction of self-assembled peptidomimetic nanotubes; (2) Self-assembled peptidomimetic nanotubes-based miR-210 detection system for living cells (Scale bars: 50 μm)^[32]

景,我们应将无尽的太阳能转化为可储存、可调控、可再生的化学能,为人类的可持续发展提供永续动力。

参考文献:

[1] TANG C, ZHENG Y, JARONIEC M, *et al.* Electro-

catalytic Refinery for Sustainable Production of Fuels and Chemicals [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2021, 60(36): 19572-19590. DOI: 10.1002/anie.202101522.

[2] BAE S, MAHMOOD J, JEON I, *et al.* Recent advances

- in ruthenium-based electrocatalysts for the hydrogen evolution reaction[J]. *Nanoscale Horizons*, 2020, 5(1): 43-56. DOI: 10.1039/C9NH00485H.
- [3] SHEN X, ZHANG C, HAN B, *et al.* Catalytic self-transfer hydrogenolysis of lignin with endogenous hydrogen: road to the carbon-neutral future[J]. *Chemical Society Reviews*, 2022, 51(5): 1608-1628. DOI: 10.1039/D1CS00908G.
- [4] WANG Y, SUZUKI H, XIE J, *et al.* Mimicking Natural Photosynthesis: Solar to Renewable H₂ Fuel Synthesis by Z-Scheme Water Splitting Systems[J]. *Chemical Reviews*, 2018, 118(10): 5201-5241. DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00286.
- [5] LV J, XIE J, MOHAMED A, *et al.* Solar utilization beyond photosynthesis[J]. *Nature Reviews Chemistry*, 2023, 7(2): 91-105. DOI: 10.1038/s41570-022-00448-9.
- [6] CHU S, ZHANG B, ZHAO X, *et al.* Photocatalytic Conversion of Plastic Waste: From Photodegradation to Photosynthesis[J]. *Advanced Energy Materials*, 2022, 12(22): 2200435. DOI: 10.1002/aenm.202200435.
- [7] MIRKOVIC T, OSTROUMOV E, ANNA J, *et al.* Light Absorption and Energy Transfer in the Antenna Complexes of Photosynthetic Organisms[J]. *Chemical Reviews*, 2017, 117(2): 249-293. DOI: 10.1021/acs.chemrev.6b00002.
- [8] LI Y, LI J, ZENG H, *et al.* Artificial Light-Harvesting System Based on Zinc Porphyrin and Benzimidazole: Construction, Resonance Energy Transfer, and Amplification Strategy for Electrochemiluminescence[J]. *Analytical Chemistry*, 2023, 95(3): 3493-3498. DOI: 10.1021/acs.analchem.2c05559.
- [9] XUE Z, LUAN D, ZHANG H, *et al.* Single-atom catalysts for photocatalytic energy conversion[J]. *Joule*, 2022, 6(1): 92-133. DOI: 10.1016/j.joule.2021.12.011.
- [10] ZHU Q, XU Q, DU M, *et al.* Recent Progress of Metal Sulfide Photocatalysts for Solar Energy Conversion[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(45): 2202929. DOI: 10.1002/adma.202202929.
- [11] WANG Z, HU Y, ZHANG S, *et al.* Artificial photosynthesis systems for solar energy conversion and storage: platforms and their realities[J]. *Chemical Society Reviews*, 2022, 51(15): 6704-6737. DOI: 10.1039/d1cs01008e.
- [12] HU Y, LI W, JIA P, *et al.* Supramolecular Artificial Light-Harvesting Systems with Aggregation-Induced Emission[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(14): 2000265. DOI: 10.1002/adom.202000265.
- [13] MILLER R, STEPHANOPOULOS N, MCFARLAND J, *et al.* Impact of Assembly State on the Defect Tolerance of TMV-Based Light Harvesting Arrays[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2010, 132(17): 6068-6074. DOI: 10.1021/ja909566z.
- [14] ZHANG D, YU W, LI S, *et al.* Artificial Light-Harvesting Metallacycle System with Sequential Energy Transfer for Photochemical Catalysis[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2021, 143(3): 1313-1317. DOI: 10.1021/jacs.0c12522.
- [15] LI D, LIU X, YANG L, *et al.* Highly efficient Förster resonance energy transfer between an emissive tetraphenylethylene-based metal-organic cage and the encapsulated dye guest[J]. *Chemical Science*, 2023, 14(8): 2237-2244. DOI: 10.1039/d2sc06022a.
- [16] WANG Y, HAN N, LI X, *et al.* Novel Strategy of Constructing Artificial Light-Harvesting System with Two-Step Sequential Energy Transfer for Efficient Photocatalysis in Water[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(40): 45734-45741. DOI: 10.1021/acsami.2c14168.
- [17] FIANKOR C, NYAKUCHENA J, KHOO R, *et al.* Symmetry-Guided Synthesis of *N,N'*-Bicarbazole and Porphyrin-Based Mixed-Ligand Metal-Organic Frameworks: Light Harvesting and Energy Transfer[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2021, 143(48): 20411-20418. DOI: 10.1021/jacs.1c10291.
- [18] LI Y, XIA C, TIAN R, *et al.* "On/Off" Switchable Sequential Light-Harvesting Systems Based on Controllable Protein Nanosheets for Regulation of Photocatalysis[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(5): 8012-8021. DOI: 10.1021/acsnano.2c00960.
- [19] XIA Y, CHEN M, LI S, *et al.* An artificial light-harvesting system with sequential energy transfer for information dual encryption and anticounterfeiting[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2022, 10(34): 12332-12337. DOI: 10.1039/D2TC00481J.
- [20] LI JING, ZHANG H, DAI X, *et al.* A highly efficient light-harvesting system with sequential energy transfer based on a multicharged supramolecular assembly[J]. *Chemical Communications*, 2020, 56(44): 5947-5952. DOI: 10.1039/D0CC01292K.
- [21] LIU G, ZHANG H, XU X, *et al.* Supramolecular photoswitch with white-light emission based on bridged bis(pillar[5]arene)s[J]. *Materials Today Chemistry*, 2021, 24(6): 100628. DOI: 10.1016/j.mtchem.2021.100628.
- [22] MARDANI H, ROGHANI-MAMAQANI H, SHAHI S, *et al.* Anti-Counterfeiting Inks Based on Förster Reso-

- nance Energy Transfer in Microcrystalline Cellulose-Grafted Poly(amidoamine) for Artificial Industries[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2023, 5(2): 1092-1102. DOI: 10.1021/acsapm.2c01251.
- [23] GUO Z, BIAN Y, ZHANG L, *et al.* Multi-Stimuli-Responsive Carbon Dots with Intrinsic Photochromism and In Situ Radical Afterglow[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(45): 2409361. DOI: 10.1002/adma.202409361.
- [24] ZHANG D, JIANG B, YANG J, *et al.* A sequential artificial light-harvesting system based on a metallacycle for sensitive detection of biothiols[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2024, 12(44): 17841-17848. DOI: 10.1039/d4tc03584d.
- [25] ZHANG D, LIU S, YANG X, *et al.* An Aggregation-Induced Emissive Platinum(II) Metallacycle as the Energy Donor of Rhodols for Ratiometric Detection of Hydrazine[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(41): 55996-56005. DOI: 10.1021/acsami.4c12744.
- [26] LI M, SHI Q, SONG N, *et al.* Self-Assembled Artificial Light-Harvesting System Constructed Using Electrostatic Interactions in Aqueous Solution for the Sensing of Heavy Metal Cations[J]. *Advanced Optical Materials*, 2023, 11(15): 2203079. DOI: 10.1002/adom.202203079.
- [27] LI Y, ZHANG L, ZHANG Z, *et al.* MnO₂ Nanospheres Assisted by Cysteine Combined with MnO₂ Nanosheets as a Fluorescence Resonance Energy Transfer System for “Switch-on” Detection of Glutathione[J]. *Analytical Chemistry*, 2021, 93(27): 9621-9627. DOI: 10.1021/acs.analchem.1c01787.
- [28] CHEN M, LU Z, LI M, *et al.* Near-Infrared Emissive Cascaded Artificial Light-Harvesting System with Enhanced Antibacterial Efficiency[J]. *Advanced Healthcare Materials*, 2023, 12(23): 2300377. DOI: 10.1002/adhm.202300377.
- [29] ZHANG W, LUO Y, JIA M, *et al.* An efficient supramolecular artificial light-harvesting system based on twisted cucurbit[15]uril and cucurbit[10]uril for live cell imaging[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 366(1): 132006. DOI: 10.1016/j.snb.2022.132006.
- [30] CHEN X, CAO Q, BISOYI H, *et al.* An Efficient Near-Infrared Emissive Artificial Supramolecular Light-Harvesting System for Imaging in the Golgi Apparatus[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, 59(26): 10493-10497. DOI: 10.1002/anie.202003427.
- [31] HUO M, DAI X, LIU Y, *et al.* Uncommon Supramolecular Phosphorescence-Capturing Assembly Based on Cucurbit[8]uril-Mediated Molecular Folding for Near-Infrared Lysosome Imaging[J]. *Small*, 2022, 18(1): 2104514. DOI: 10.1002/sml.202104514.
- [32] SONG Y, CAI X, WANG M, *et al.* Assembly of highly efficient aqueous light-harvesting system from sequence-defined peptoids for cytosolic microRNA detection[J]. *Nano Research*, 2024, 17(8): 788-796. DOI: 10.1007/s12274-023-6008-0.



易涛,教授,博导,国家杰出青年基金获得者,入选上海市浦江人才和上海市优秀学术带头人。1987、1990和1998年在北京大学分别获学士、硕士和博士学位,1999—2004年分别在日本京都大学(日本学术振兴会JSPS博士后)、日本东京大学和法国巴黎大学(Ⅺ校)从事研究工作,2004年5月加盟复旦大学,2019年加盟东华大学,从事分子/超分子光功能材料,生物分子的荧光检测和荧光成像以及诊疗一体化等方面的研究。在*J. Am. Chem. Soc.*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, *Adv. Mater.*, *Adv. Sci.*, *Chem. Soc. Rev.*等期刊发表研究论文240余篇。被*Nature China*, *Chemistry World*, *Noteworthy Chemistry*等国外科技新闻杂志亮点评述。获上海市自然科学二等奖(第一完成人,2023),教育部自然科学一等奖(第二完成人,2015),国家科技进步二等奖(第四完成人,2000)。担任无机化学学报、*Smart Molecules*, *Crystals*等期刊编委。兼任上海市生物医学工程学会委员、中国晶体学会陶瓷专业委员会委员、稀土材料化学与生物交叉专委会委员等。

(责任编辑:张伟杰)