2026 年 10 月 色 谱 Vol.44 No.10
October 2026 Chinese Journal of Chromatography 1150~1161

专论与综述 DOI: 10.3724/SP.J.1123.2026.01025

光响应金属-有机骨架结构特征与吸附分离性能动态调控

刘莉萌[1#], 解文哲[1#], 曲艳莹[2], 蔡天培[1], 李东浩[1,2*], 商海波[1,2*]

(1. 延边大学理学院化学系, 吉林 延吉 133002; 2. 长白山天然药物研究教育部重点实验室(延边大学), 吉林 延吉 133002)

摘要:光响应金属-有机骨架(photoresponsive metal-organic frameworks, PMOFs)是将光敏分子引入金属-有机骨架(MOFs)构建而成的一类智能材料,其兼具 MOFs 自身优越的孔结构与光致异构性能动态调控特性,在精准调控吸附分离行为、吸附剂绿色节能回收应用中展现出独特的优势,受到广泛关注。本文综述了常见光敏分子的种类和性质,包括偶氮苯类、螺吡喃类、二芳基乙烯类、螺噁嗪类、俘精酸酐类、席夫碱类,以及 3 种光敏基团/分子与 MOFs 的构建方式,如骨架接入型、侧基接入型和客体嵌入型。通过总结分析不同光敏基团异构化性质差异与 PMOFs 的结构特征,介绍了光致异构对 MOFs 性质的多维度调控,如孔道尺寸、表面性质、骨架形状等。结合典型应用研究案例,从构-效视角探讨 PMOFs 在小分子气体、金属离子、染料吸附分离应用中的调控模式与应用潜力。最后,本文对 PMOFs 面临的核心问题进行了总结,借以同研究者讨论并推动 PMOFs 多维度的探索和发展。

关键词:光响应金属-有机骨架;光敏分子;光致异构;吸附;分离;综述

中图分类号:O658 **文献标识码**:A

Structural features and regulation of adsorption/separation properties of photoresponsive metal-organic frameworks

LIU Limeng[1#], XIE Wenzhe[1#], QU Yanying[2], CAI Tianpei[1], LI Donghao[1,2*], SHANG Haibo[1,2*]

(*1. Department of Chemistry, College of Science, Yanbian University, Yanji 133002, China; 2. MOE Key Laboratory of Natural Medicines of the Changbai Mountain, Yanbian University, Yanji 133002, China*)

Abstract: Metal-organic frameworks (MOFs) are attractive porous materials with periodic network structures, which are constructed via the self-assembly of metal ions (or metal clusters) and bridging organic ligands. MOFs have some unique advantages of designability, ordered pore structure, high specific surface area and modifiability. Photoisomerization refers to the phenomenon in which, under light of specific wavelengths, the molecular structures of certain compounds undergo reversible interconversion due to photoexcitation. Both isomeric forms can exist stably under certain conditions and exhibit distinct chemical and physical properties. On this basis, photoresponsive MOFs (PMOFs) are proposed as a class of smart materials constructed by integrating photoactive molecules into MOFs. PMOFs combine the inherent superior porous structure of MOFs with the dynamic tunability enabled by photo-induced isomerization and exhibit unique advantages in many fields, including catalysis, drug release, separation, anti-counterfeiting, etc. PMOFs, for instance, can precisely regulate adsorption/separation behaviors and enable green, energy-efficient recovery of adsorbents under photoinduction, which has attracted widespread attention. This review summarizes common

收稿日期:2026-01-28

共同第一作者.

* **通信联系人**.Tel:0433-2436452,E-mail:dhli@ybu.edu.cn(李东浩);Tel:0433-2436452,E-mail:hbshang@ybu.edu.cn(商海波).

基金项目:吉林省科学技术厅科技发展计划项目-自由探索一般项目(YDZJ202301ZYTS301);吉林省教育厅科学技术研究项目-一般项目(JJKH20250401KJ).

Foundation item: Jilin Provincial Department of Science and Technology, China (No. YDZJ202301ZYTS301); Education Department of Jilin Province of China (No. JJKH20250401KJ).

types and properties of photoactive molecules, including azobenzene, spiropyran, diarylethene, spirooxazine, fulgide, Schiff base, etc., as well as three main integration strategies of photosensitive units/molecules with MOFs frameworks. Backbone incorporation involves using the entire photoactive organic molecule as an organic ligand within the MOF framework. For side-group grafting, the photoactive moiety is attached as a side group or through post-synthetic modification of the organic ligand, effectively grafting it onto the MOF backbone. Guest encapsulation is referred to embedding photoactive molecules as independent guest species within the cavities or pores of the MOF. By analyzing the differences in isomerization of various photoactive groups and the structural features of different integration modes, the multidimensional modulations of MOF are illustrated in pore size, surface properties, host-guest interaction, "hiding" and "exposure" of adsorption active sites, and framework geometry via photoisomerization. Furthermore, from a structure-performance perspective and with representative case studies, this review discusses the regulatory mechanisms and application potential of PMOFs in the adsorption and separation of small-molecule gases, metal ions, and organic dyes. The key limitation of PMOFs lies in whether the MOF framework is robust enough to tolerate the molecular mechanical forces produced by photoswitch configurational rearrangements. The cyclic photo-switching performance of PMOFs is often unsatisfactory, which is primarily attributed to the molecular mechanical forces generated during repeated photoisomerization, which may cause local microscopic distortion, phase transitions, or even framework collapse in MOFs. In addition, the photo-response efficiency of PMOFs is inadequate, which is obviously lower than photosensitive molecules in solution. This is likely due to limited optical penetration depth, steric hindrance within the pores, and framework-induced quenching of the excited-state configuration. The above challenges are summarized in this paper, with the aim of facilitating discussions among researchers and promoting their multidimensional exploration and development.

Keywords: photoresponsive metal-organic frameworks; photosensitive molecules; photoisomerization; adsorption; separation; review

金属-有机骨架(metal-organic frameworks, MOFs)是由金属离子和多齿有机配体通过配位键自组装合成的多孔晶体材料。MOFs 具有周期性的网络骨架、高孔隙率、大比表面积、孔径可调控等特点,已经被广泛用于催化[1]、传感[2]、气体存储及分离[3-5]、萃取分析[6]以及药物释放[7]等领域。在 MOFs 发展历程中,研究者们不断地通过功能化和后修饰等方法调节 MOFs 的性质,以期获得更加优异的应用性能[8-10]。光敏分子是一类具有光刺激结构异构化特性的有机分子,并且光致异构能够引起分子尺寸、极性、带电性质、颜色、熔沸点等物理化学性质的差异[11-14]。因此,研究者们将 MOFs 与光敏分子相结合,设计提出光响应金属-有机骨架(photoresponsive metal-organic frameworks, PMOFs),利用光驱动对分子构型的精确控制,可实现 MOFs 孔道尺寸与形状、表面性质等方面的原位、动态可逆与高精度调控,为 MOFs 功能化提供了新思路。实际上,PMOFs 的发展经历了一段从尝试将光敏"元素"引入 MOFs 骨架到光驱动"调控"的过程。Reineke 等[15]于 2000 年尝试将 4,4′-偶氮二苯甲酸(azobenzene-4, 4′-dicarboxylic acid, ADB)和硝酸铽五水合物($Tb(NO_3)_3\cdot 5H_2O$)构建 MOF-9 [$Tb_2(ADB)_3[(CH_3)_2SO]_4\cdot 16[(CH_3)_2SO]$],后续以偶氮苯类光敏分子为主要有机配体的 MOFs

引用本文:刘莉萌,解文哲,曲艳莹,蔡天培,李东浩,商海波. 光响应金属-有机骨架结构特征与吸附分离性能动态调控. 色谱, 2026,44(10):1150-1161.

LIU Limeng, XIE Wenzhe, QU Yanying, CAI Tianpei, LI Donghao, SHANG Haibo. Structural features and regulation of adsorption/separation properties of photoresponsive metal-organic frameworks. Chinese Journal of Chromatography, 2026, 44(10): 1150-1161.

也相继合成，比如，Cd(3,3′-AZDB)$_2$(H$_2$NMe$_2$)(NH$_4$)[16]和[In$_3$O(C$_{16}$N$_2$O$_8$H$_6$)$_{1.5}$(H$_2$O)$_3$](H$_2$O)$_3$(NO$_3$)[17]等，但以上研究都只是利用反式偶氮苯分子的分子特征，并没有开启“光调控”功能。直至 2011 年，Stock 等[18]以 3-偶氮苯基-4，4′-联吡啶（3-azo-phenyl-4，4′-bipyridine）和 2，6-萘二甲酸（2，6-naphthalenedicarboxylic acid）双配体与 Zn(NO$_3$)$_2$·6H$_2$O 配位构建了 CAU-5，在此工作中，偶氮苯以配体侧基的形式存在于结构单元（孔内壁）中，实现了光诱导 MOFs 骨架下偶氮苯顺反式构型转化，避免了偶氮苯异构化在刚性骨架中受阻的问题。自此，研究者们从光敏有机配体结构设计以及 MOFs 与光敏分子结合方式等方面多维度创新，使得 PMOFs 种类和性能得到了显著发展。另外，鉴于 PMOFs 在精准调控分离分析领域的巨大潜力，本文系统梳理了 PMOFs 的最新研究进展，聚焦于 PMOFs 结构特征、性质调控及其在吸附分离中构-效关系与应用，并对 PMOFs 在吸附分离领域中面临的挑战和未来发展进行了展望。

1 常见光敏分子结构及构型转化

光敏分子种类繁多，根据光致异构机制主要分为顺反异构、电环化和混合机制 3 大类[19]。其中，顺反异构机制的光敏分子主要包括偶氮苯类、二苯乙烯类、席夫碱类、靛蓝类、腙类、手性拥挤烯烃等；电环化机制包括二芳基乙烯类、二氢芘及其衍生物等；混合机制主要有二氢萘类、俘精酸酐类、螺吡喃类、螺噁嗪类及供体-受体 Stenhouse 加合物等。其中，偶氮苯类、螺吡喃类与二芳基乙烯类光敏分子因优异的光致异构性能与独特的结构，常用于构建 PMOFs，而供体-受体 Stenhouse 加合物[20-22]、二氢萘[23]等作为新型光敏分子在 PMOFs 中的应用近期逐渐受到关注，但是相关研究还主要局限于 PMOFs 构筑，在应用领域的探索较少。因此，本文主要介绍常见的偶氮苯类、螺吡喃类、螺噁嗪类、二芳基乙烯类、席夫碱类、俘精酸酐类等光敏分子（图 1）。

1.1 偶氮苯类

偶氮苯类光响应化合物由–N=N–将两个芳香

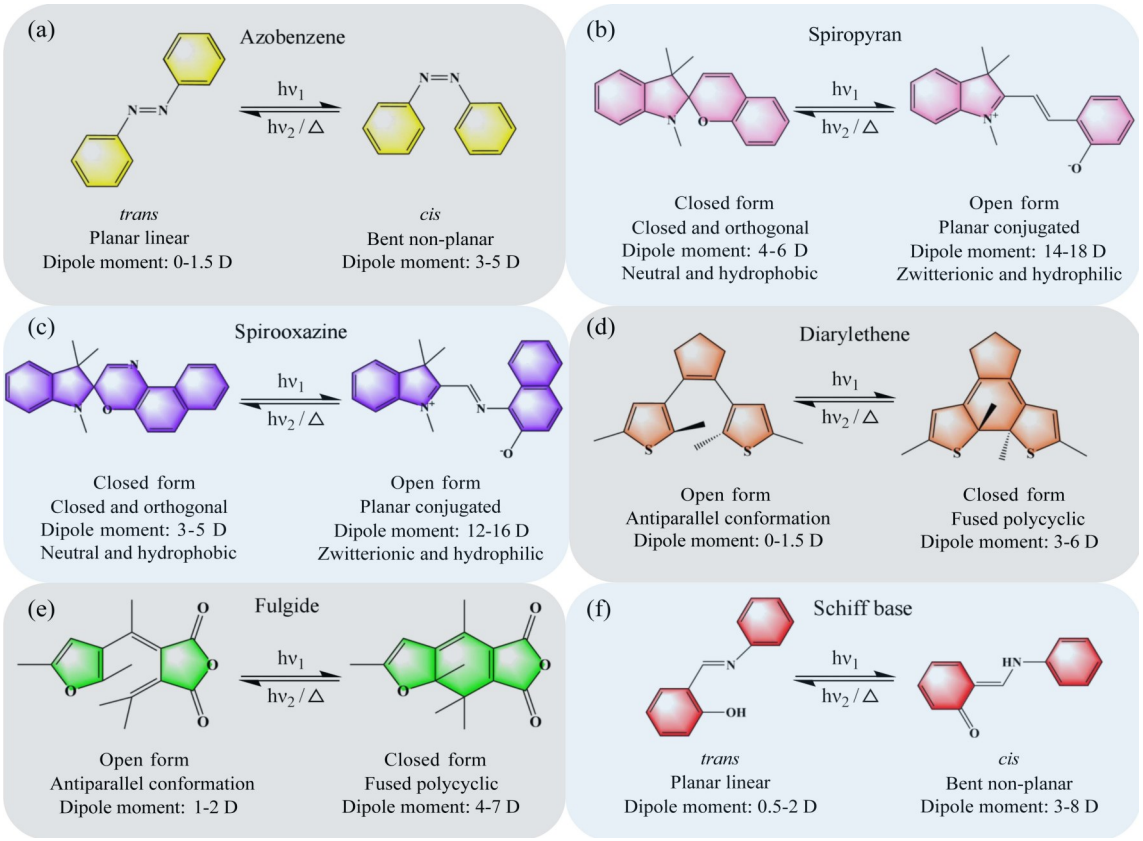


图 1 常见光敏分子及其光致异构化过程

Fig. 1 Chemical structures and photoisomerization of common photosensitive molecules

hν1 and hν2 denote photoinduction conditions using two different wavelengths of irradiation.

环连接而成，在特定波长光诱导下，能够发生顺反式构型可逆转化（图 1a）。一般情况下，在紫外光（如 365 nm）诱导下偶氮苯分子结构由反式变为顺式，但经过可见光（如 473 nm）诱导或者加热后，顺式构型会转化为热力学稳定的反式结构[14,24]。在紫外光诱导下，顺式偶氮苯的光激发态能量势垒（异构化的阻挡层）为 200 kJ/mol。因此，从反式到顺式光异构化速度非常快，仅需几皮秒，而无外界刺激下，从顺式转变为反式却需耗费几毫秒到几小时[13]。偶氮苯结构变化会伴随着分子颜色、尺寸、偶极矩、结构和极性等性质的变化，比如，反式偶氮苯对位碳原子之间的距离约为 9 Å，顺式偶氮苯约为 6 Å，分子偶极矩也会由反式的 0 D 增大到顺式的 3 D[25]。偶氮苯几乎只受光诱导的影响，而且具有非常出色的抗光疲劳性，这也是偶氮苯成为光响应领域中明星分子的原因。

1.2　螺吡喃和螺噁嗪类

螺吡喃类化合物的结构是苯并吡喃和吲哚啉芳杂环由一个 sp^3 杂化的碳原子连接而成的（图 1b）。两个芳杂环的平面相互正交，呈现一种立体的非平面结构，即闭环结构（螺吡喃，SP）。在紫外和可见光诱导下，螺吡喃分子可呈现开环（部花菁，MC）和闭环两种结构的可逆转换。当紫外光诱导时，C–O 键发生断裂，sp^3 杂化的碳原子逐步变为 sp^2 杂化，电子组态发生重排，两个芳杂环变为同一个平面，整体呈现一种开环共轭状态。在可见光下，开环部花菁结构转化为闭环状态，即螺环处 C–O 键恢复连接。闭环构型分子主要表现为中性、疏水、偶极矩较小，但是开环构型分子为离子态，表现出亲水性以及明显增大的分子尺寸与偶极矩。螺吡喃开环与闭环分子结构、电子状态和物理化学性质会发生剧烈转变，这样明显的差异引起的宏观表现就是颜色变化。闭环态因螺环结构共轭体系较小，通常为无色，而开环部花菁结构为平面长共轭体系，导致其吸收光谱红移到可见光区（通常为 500~600 nm），因此呈现出强烈的紫色、蓝色或品红色。除光诱导外，螺吡喃类分子也受极性溶剂、光、热、压力等外界刺激因素影响[26-30]。螺吡喃类分子最大的弱点在于其抗光疲劳性和可重复性较差，易被氧化降解。

螺噁嗪类化合物与螺吡喃的结构相似，也是由一个 sp^3 杂化的碳原子连接两个芳杂环，核心差异在于其中一个芳杂环是噁嗪环（图 1c）。在光诱导下，螺噁嗪类化合物同样会在闭环与开环分子状态之间发生可逆转化，而开环/闭环下的分子整体结构亦与螺吡喃相近，即闭环分子整体呈现一种相互正交的立体结构，不存在共轭体系，开环分子整体变为一个平面结构，存在一个较大的共轭体系，从而使颜色由无色转变为蓝色。螺噁嗪的开环体中大部分为醌式结构，具有正的溶剂显色效应，即当溶剂极性增加时，吸收光谱发生红移效应；而且当溶剂极性增加时，其热消色速率常数增大。但是与螺吡喃相比，螺噁嗪的开环体比较稳定，这是因为氮原子参与了电子离域的结果，在光稳定性和耐疲劳性方面也有了较大的提高，受到研究者广泛的关注[31-35]。

1.3　二芳基乙烯类

二芳基乙烯类是被科学工作者研究最多的光致变色化合物之一（图 1d）。二芳基乙烯类化合物是日本科学家 Irie 在二苯乙烯结构基础上设计合成[36]，经过数十年来科研人员对分子结构的衍生以及光致异构性能的调控，其俨然已成为一类结构丰富、功能多样性、应用广泛的光致变色材料[37-42]。二芳基乙烯化合物开环体的主要骨架可以拆分为两个相对独立的单元，即中心的烯桥和两侧的杂芳环，共同组成了一个 1,3,5-己三烯的反对称结构。该结构是二芳基乙烯进行光反应的核心，通常在紫外光诱导下会发生 6π 电子体系的光环化反应，形成具有环己二烯结构的闭环体，而经过一定波长可见光照射或者加热条件会发生开环反应。二芳基乙烯的开环体是热力学稳定状态，但两个杂芳环之间的空间位阻较大，沿着烯桥方向会有两个不同的构象存在，即成镜面对称的平行构象和轴对称的反平行构象，且两种构象的能量相近，因此在开环体中二者几乎以 1:1 的比例共存，甚至当烯桥位阻较小时，两种构象在室温下可相互转换。平行构象是一种光惰性结构，只有反平行构象才具有光化学反应活性，光诱导下能够实现开环/闭环可逆循环。

二芳基乙烯类光敏材料具有优异的热稳定性、抗疲劳性以及高效的开环/闭环转化率。分子开环/闭环循环次数甚至可以达上万次，光响应在 2~20 ps 内即可发生，而且大多数的二芳基乙烯分子在光作用下其开环/闭环转化率可接近 100%。二芳基乙烯主体结构决定了光致变色性能的优劣。研究者们通过对烯桥和杂芳环单元的结构设计，可以使二芳基乙烯获得更加优异的光物理性质，这也极大地

丰富了二芳基乙烯类化合物的结构。比如，最早人们发现将噻吩、呋喃等弱芳香性五元杂环引入二芳基乙烯结构，能提高闭环异构体的热稳定性与抗光疲劳性。

1.4 俘精酸酐类

俘精酸酐类化合物是丁二酸酐的二亚甲基衍生物，是最早被合成的有机光致变色化合物之一，主要分为芳环类俘精酸酐和芳杂环类俘精酸酐[38,43-46]（图 1e）。与二芳基乙烯类化合物类似，在紫外光诱导下，分子内发生周环反应，形成闭环结构，而在可见光诱导或加热后可恢复为开环状态。同样地，俘精酸酐开环构型也有平行和反平行两种构象，产生异构化的周环化反应只会发生在反平行构象中。值得关注的是，俘精酸酐类化合物具有良好的热力学稳定性，而且芳杂环类俘精酸酐优于芳环类俘精酸酐，一旦生成闭环体，在黑暗和室温条件下，它不会自发地、热驱动地变回开环体，备受研究者青睐。在光吸收谱方面，芳杂环俘精酸酐闭环体吸收波长在一定程度上得以拓展，使得开环体与闭环体的光吸收谱相互分离，为其在无损读取存储信息方面提供了基础。常见芳杂环型俘精酸酐有吡咯型、吲哚型、呋喃型、噻吩型。其中，噻吩俘精酸酐的热稳定性明显优于其他芳杂环型化合物，吡咯俘精酸酐则在光量子产率方面表现较为出色。

1.5 席夫碱类

席夫碱类化合物结构上带有相邻的酚羟基和亚胺键（C=N 键），其中 C=N 键是席夫碱的光活性中心与光响应的关键单元（图 1f）。大多数光敏席夫碱都连接有苯环、萘环等芳香结构，起到扩展共轭体系和提供结构刚性的作用。在紫外光诱导下，邻位酚羟基上的氢会在分子内氢键作用下转移到 C=N 键的氮上，从而发生了由反式向顺式结构转变的异构化。反式主体为烯醇式结构，O 和 N 原子易与金属离子（如 Zn^{2+}，Cu^{2+}，Al^{3+}）配位，形成稳定的配合物，而顺式为酮式结构，配位原子位置和电子云密度改变，配位能力显著减弱或丧失。在分子极性方面，顺式结构极性强于反式，亲水性也随之增强。相比于偶氮苯类、二芳基乙烯类等光敏化合物，席夫碱类化合物存在光稳定性（顺式构型）和抗疲劳性相对较差，易受其他环境因素影响（尤其是溶剂和 pH），光量子产率低等问题，限制了其在光信息存储、生物体内光控/成像、分子机器、光驱动器件等领域的应用[47,48]。

2 PMOFs 构筑方式与结构特征

光敏分子用于构筑 PMOFs 自身需要具备以下条件：1）作为有机配体在异构体之间的光异构化反应中表现出高效率；2）异构体具有足够的热稳定性，不会在黑暗中转化为另一种异构体，无副反应；3）异构化具有高度可逆性，光致变色单元必须具有优异的抗疲劳性[49]。光敏基团/分子与 MOFs 结合方式是 PMOFs 设计合成的关键。目前，光敏基团/分子引入 MOFs 主要有 3 种（图 2）：一是骨架接入，即直接将含光敏基团的有机分子整体作为有机配体；二是侧基接入，主要通过有机配体侧基修饰将光敏基团骨架接枝到 MOF 骨架上；三是客体分子嵌入，将光敏分子作为独立的客体分子引入到 MOFs 空腔中。

2.1 骨架接入型

骨架接入型 PMOFs 的设计思路是以光敏分子骨架为核心“桥梁”，分子骨架的两端延伸常见的配位基团与金属离子配位结合，如 $-NH_2$，-COOH 等。在特定波长的光诱导下，MOFs 的有机配体整体发生构型改变，最明显的是引起 MOFs 孔道形状、尺寸的变化，将“硬”MOFs 从微观层面驱动变成“软”MOFs。目前，骨架接入型 MOFs 研究较少，这是因为部分光敏分子构型转化需满足分子变化自由度，如基团旋转、键角变化等。然而将光敏分子整体作为 MOFs 有机配体同金属离子配位，相当于将光敏分子“双锚定”，导致分子失去了构型转化自由度，这也是一些基于偶氮苯衍生物构筑的 MOFs 没有展现出光响应特性的原因之一[18]。二芳基乙烯类化合物的构型转化是基于中心烯桥的周环反应，开环与闭环结构转化时分子变化自由度低，当二芳基乙烯类衍生物作为有机配体时，可保持烯桥两侧的杂芳环自由度，通过中心烯桥部分配位连接金属节点（类型Ⅰ）[50]，反之，通过两侧的杂芳环与金属离子配位构筑 MOFs（类型Ⅱ），赋予 MOFs 光响应特性[49,51,52]。Katz 等[50]采用溶剂辅助配体交换（SALE）法，利用咪唑类二芳基乙烯光敏化合物（4,5-bis(2,5-dimethyl-3-thienyl)-1*H*-imidazole）与 ZIF-70 合成了具备类型Ⅰ构筑特征的 PMOFs PSZ-1（图 3a）。同时，ZIF-70 较大的孔道（约 1.5 nm）为光诱导开环/闭环转化提供了有效空间。PSZ-1 不仅具有可逆的光异构性能，其结构在紫外光照射下呈现仅吸收紫外光的开放构型（PSZ-1-open），而在

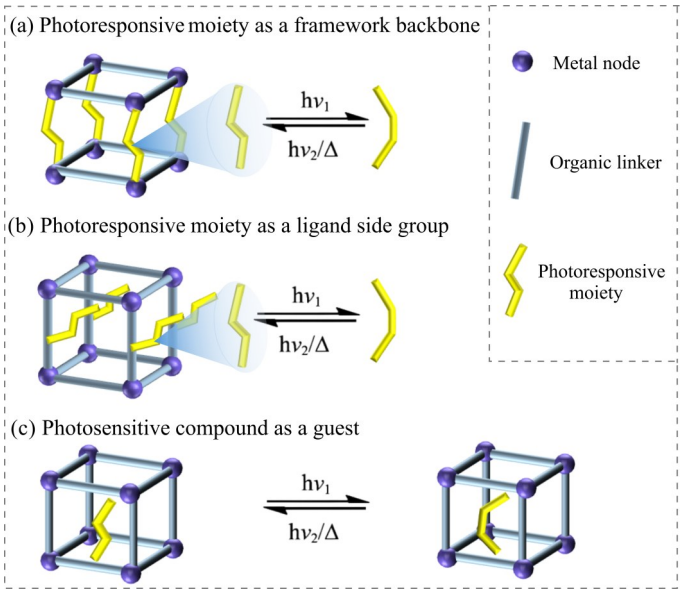


图 2　光敏基团/分子引入 MOFs 中的 3 种方式

Fig. 2　Three strategies of photosensitive moieties introduced into metal-organic frameworks (MOFs)

可见光照射下则转变为吸收可见光的闭环构型(PSZ-1-close)。同时，骨架接入型 PMOFs 的光致异构化能够用于改变主客体之间的相互作用，从而调控吸附目标物的洗脱速率。Wang 等[52]采用自下而上(bottom-up)的合成方法，Zn^{2+}与噻吩二芳基乙烯化合物两侧的噻吩杂环进行配位(类型Ⅱ)，构筑了一种二芳基乙烯的 PMOFs $[Zn_2(SDC)_2(BPMTC)]$ (BPMTC=bis(5-pyridyl-2-methyl-3-thienyl) cyclopentane, H_2SDC=stilbene-4,4′-dicarboxylicacid)，由光诱导可切换芳基乙烯单元引起的骨架光异构化导致了前所未有的孔径尺寸调节，从而实现了 C_2H_2 的高选择性吸附和可控的低能量释放(图 3b)。值得关注的是，骨架接入型 PMOFs 面临着长期潜在风险，即光敏核心基团光异构化产生的机械应力可能会对 MOFs 整体结构造成不可逆的损害，影响材料的应用寿命。Kitagawa 等[49]通过将结构柔性引入基于二芳基乙烯配体构筑的双重互穿晶态多孔框架 $[Zn_4(bdc)_4(L_O)_2\cdot 4DMF\cdot H_2O]_n$ (H_2bdc=1,4-benzenedicarboxylic acid, L_O=bis(pyridyl) dithienylethene)，实现了紫外与可见光照射下定量可逆光化学反应的策略(图 3c)。多孔框架的结构柔韧性使二芳基乙烯配体的电环化反应能以单晶到单晶转变的方式高效进行，解决了光化学过程所产生应力与应变的内在结构柔韧性不兼容的问题。

2.2　侧基接入型

骨架接入型 PMOFs 面临多方面挑战，而侧基接入型 PMOFs 恰恰避开了 MOFs 自组装与晶体完整度保持困难的问题，因此侧基接入的策略成为 PMOFs 构建的主要方法。侧基接入型 PMOFs 的光异构化本质上仅是光响应侧基的异构化，主要调控孔道相对尺寸、孔道边界极性、带电性等，对 MOFs 骨架整体性影响明显弱于骨架接入策略。相比于骨架接入型方式，侧基接入的形式受限因素较少，从适用的光敏分子类型到侧基接枝方式都呈现了多样化，极大地丰富了 PMOFs 种类。目前，光响应基团作为侧基引入 MOFs 的方式主要有以下 3 种(图 4)：1)光敏分子与有机配体通过共价键来接枝[54,56]；2)有机配体自带光响应侧基，但是侧基不参与 MOFs 骨架的构筑，保持构型转化的自由度[53,57]；3)光敏分子衍生物与金属节点以单配位的方式“悬挂”在 MOFs 骨架中，并依然保持光敏核心基团异构化的自由度[58,59]。偶氮苯及其衍生物是应用最多的用于制备侧基接入型 PMOFs 的光敏化合物。Heinke 等[53]设计合成了 5 种含偶氮苯光开关的柱层式 PMOFs，以丁醇作为探针分子，结果表明，尽管该系列框架具有相似结构，但其开关效应强度存在显著差异，决定开关效应的关键因素是孔体积内偶氮苯基团的密度，并非孔径大小或单孔道内偶氮苯分子数量，而在每个金属-有机骨架晶胞内达到高密度偶氮苯基团时才能实现显著开关效应，这一发现为 PMOFs 实现开关效应提供了设计准则(图 3d)。除此之外，也可利用有机配体侧位的活性

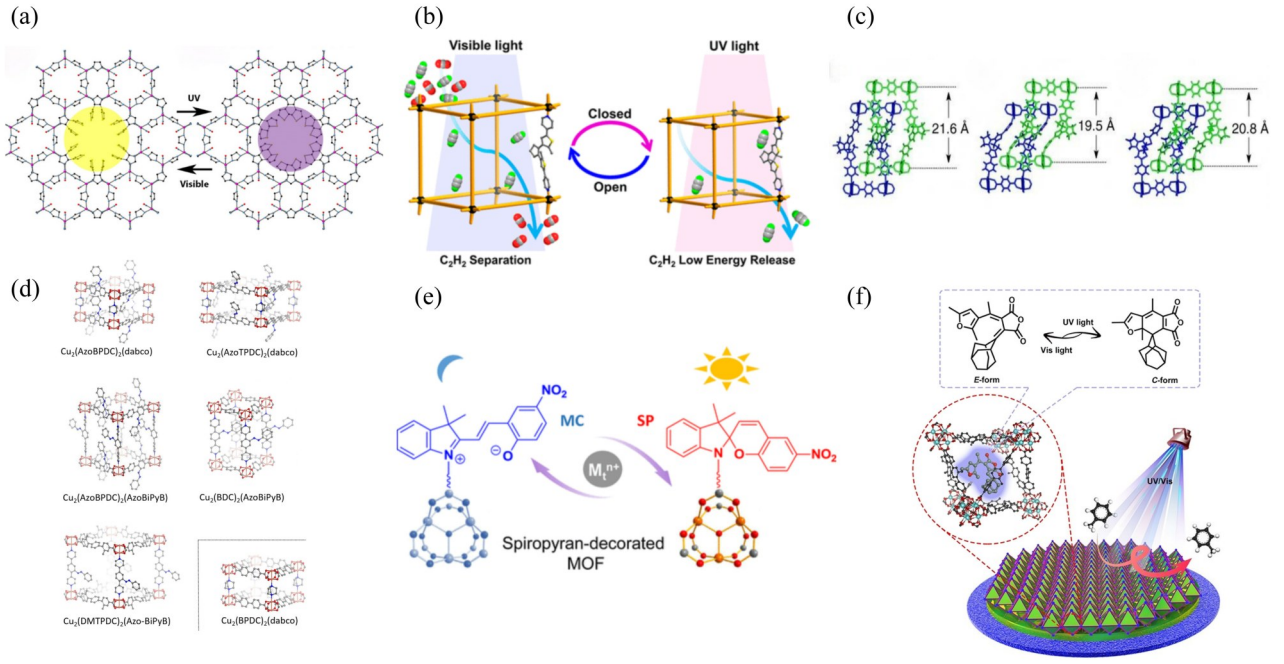


图 3　不同类型 PMOFs 示例

Fig. 3　Examples of different types of photoresponsive MOFs (PMOFs)

a. PSZ-1 in both the open and closed conformation[50]; b. a diarylethene functional MOF [$Zn_2(SDC)_2(BPMTC)$] for C_2H_2 high selectivity adsorption and photo-switchable low energy release[52]; c. change of the twofold interpenetrated frameworks of $[Zn_4(bdc)_4(L_O)_2 \cdot 4DMF \cdot H_2O]_n$ by L_O photoisomerization[49]; d. sketch of the series of PMOF with the azo-benzene side groups in the *trans* form[53]; e. MIL-101(Cr) covalently immobilizing photoactive SP molecules via amide linkages[54]; f. schematic presentation of MOF UiO-68 incorporated with Aberchrome 670[55].

基团(–NH_2 等)共价键合光敏基团的方式向 MOFs 中引入光敏侧基,如螺吡喃共价修饰的 MIL-101(Cr),并可用于从盐水中吸附多种一价和二价盐以及光驱动可控释放(图 3e)[54]。

2.3　客体分子嵌入型

客体分子嵌入型 PMOFs 与上述两种类型本质的区别在于光敏分子以自由分子形式存在于 MOFs 空腔内,而非固定化形式[55,60-64]。因此,在特定波长

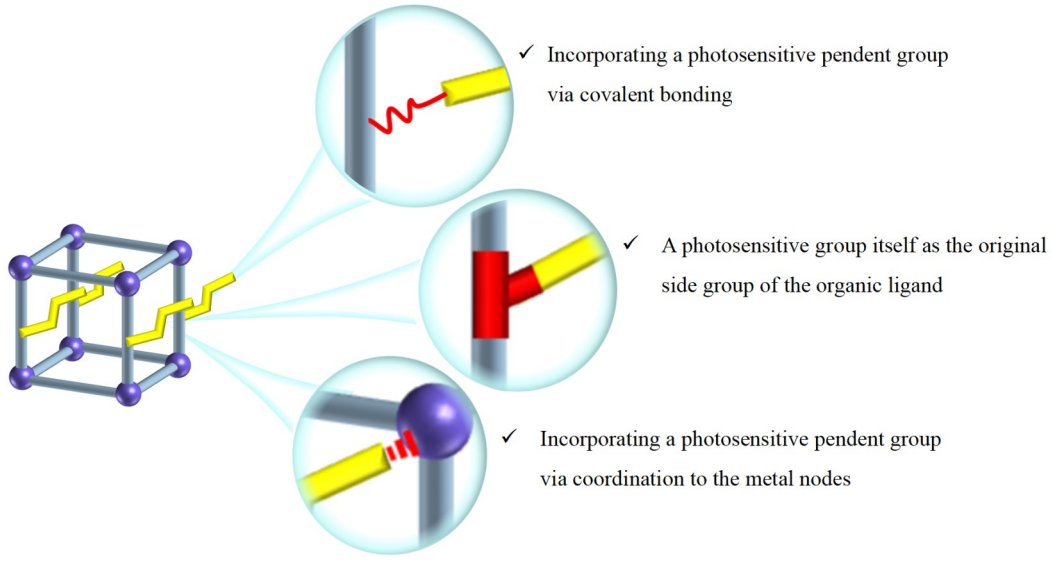


图 4　光响应基团作为侧基引入 MOFs 的 3 种方式

Fig. 4　Three methods for introducing photosensitive groups as pendent groups into MOFs

诱导下光敏分子在 MOFs 空腔内发生构型转化，与侧基接入型 PMOFs 相似，光敏分子构型转化对 MOFs 晶体结构无实质性影响，仅改变孔道尺寸以及空腔极性、带电性等。理论上，若光敏分子在 MOFs 内能够发生构型转化，需至少满足光敏分子尺寸小于 MOFs 空腔的孔径，否则会存在明显的空间位阻，阻碍光致异构化。同时，客体嵌入式的方法具有一定的通用性，为一些难以通过化学键合、配位等方式接入骨架的光敏分子提供了机会，如俘精酸酐类化合物[55,64]。Heinke 等[55]通过向 UiO-68 孔道内嵌入 Aberchrome 670 型俘精酸酐光致变色分子而赋予 MOFs 光开关功能，以甲苯与甲醇作为探针分子，实现了基于俘精酸酐的 MOFs 对吸附与扩散特性的光诱导远程调控（图 3f）。研究表明，当将嵌入的俘精酸酐从其开环（*E* 构型）可逆光切换至闭环（*C* 构型）时，甲苯吸附量可提升 37%，甲苯扩散系数可提高 40%。

3　光诱导调控 MOFs 性质

PMOFs 最吸引人的特点是通过非侵入式、时空精准的光诱导手段，实现对 MOFs 多种性质的动态、可逆调控。光敏分子在光诱导下发生可逆异构化（如顺反异构、光环化/开环），往往伴随着其自身分子尺寸、构型、偶极矩、极性、电子分布等变化。作为 MOFs 骨架中的组成部分（配体、侧基或客体）时，光敏化合物通过结构微观变化，改变 MOFs 的性质。从 MOFs 自身性质角度分析，光诱导调控 MOFs 的主要性质见图 5。

3.1　孔道尺寸

部分光敏分子光致异构化会引起分子尺寸变化，可直接引起 MOFs 孔径与窗口尺寸的改变，尤其是偶氮苯作为侧基，偶氮苯从直线型反式变为弯曲的顺式时，会有约 3 Å 的分子尺寸差异，这也就实现了孔道或窗口亚纳米级的精细化调控[53,57-59]。当光敏分子尺寸与窗口尺寸达到“契合”时，可实现分子筛分效应的“门控/开关”光驱动切换。进一步地，光敏分子的异构化“占据”或“释放”孔道空间，亦可动态、可逆地调节 MOFs 的有效比表面积和孔隙体积。偶氮苯类和螺吡喃类在孔道尺寸调控方面表现最为亮眼，研究也最为广泛。例如，带有偶氮苯侧基的 PCN-123，偶氮苯反式构象下其孔径主要分布在 10.0 Å 和 11.8 Å，并且两种孔径相对比例近似相等，而紫外光诱导下偶氮苯异构化为顺式时，11.8 Å 孔径比例有所增加，对应 10.0 Å 孔径比例明显降低[57]。然而，当偶氮苯分子限域于 UiO-66 亚纳米通道（空腔 9~12 Å，窗口 6 Å）中，因尺寸接近，相当于偶氮苯分子高效占据了主要离子通道，光诱导下顺反异构化带来了光驱动“分子门控”效应，通道有效空间的“占据”与“释放”，实现了离子通量高效调控[63]。

3.2　表面化学性质与主体相互作用

许多光敏分子异构化前后偶极矩会发生明显

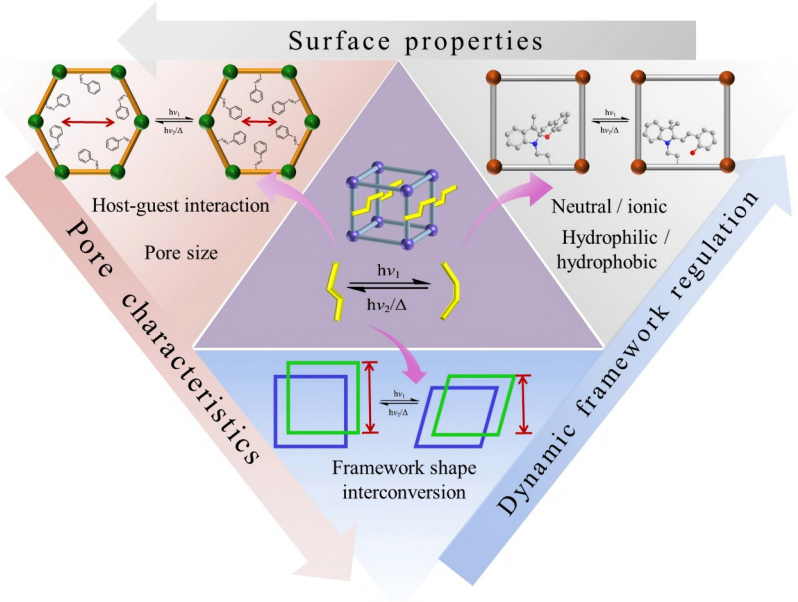


图 5　光诱导调控 MOFs 性质

Fig. 5　Regulation of MOFs properties via photoinduction

变化。例如，螺吡喃开环变为部花菁结构时分子极性显著增强，偶氮苯顺式构型稍强于反式，这一性质能够可逆地整体改变 MOFs 孔道内壁的亲/疏水性。除此之外，部分光敏分子光异构化可能使特定的官能团（如–OH，–N=N–）从“隐蔽”变为“暴露”，或改变其空间取向，或从分子态转变为离子态，也可实现光驱动下动态“呈现”或“隐藏”特定的化学结合位点。此时，若 MOFs 骨架上的光敏基团本身可作为与客体分子相互作用的位点，上述结构的微观变化，可增强或削弱与特定客体（如 CO_2、药物分子）的氢键、π-π 堆积或静电作用等，实现主-客体相互作用的远程调控。Chen 等[62]将磺酸化螺吡喃（sulfonated spiropyran，SSP）以客体分子形式引入 ZIF-8 空间内，制备了光响应 SSP@ZIF-8 膜，因螺吡喃开环形式带有电荷且更亲水，引起 Li^+结合位点及其与螺吡喃结合亲和力的变化，光诱导前后 Li^+电导率开关比达到 23.0。

3.3 框架动态调控

某些 MOFs 骨架呈现一定的柔性特质，当光敏分子参与到柔性 MOFs 骨架构筑中，光驱动下光敏分子异构化可能会带动整个框架发生可逆的结构性变化，如膨胀或收缩，部分研究工作中称之为“呼吸”效应。这种调控本质上是单晶到单晶转变，多见于骨架接入型 PMOFs[49,51]。光诱导下光响应 PMOFs 骨架的动态调控会在多方面产生独特的影响，比如，吸附容量与选择性的动态切换、扩散动力学与分离因子调控、自适应催化等。例如，前文提及的柔性互锁的双（吡啶基）二噻吩乙烯类 PMOFs $[Zn_4(bdc)_4(L_O)_2\cdot 4DMF\cdot H_2O]_n$，其呈现三维柱层结构，光致异构配体噻吩环上的反应性碳原子在骨架中呈开环形式的反平行构型，并且碳原子间距为 3.52 Å，能在多种溶剂中实现开环与闭环异构体的高效互变，而这样的光致开环与闭环异构化引起了 PMOFs 层间距从 21.6 Å 到 20.8 Å 的缩短，二维层间产生了横向滑移运动，孔体积显著从 30% 降低至 21%[49]。

4 PMOFs 在吸附分离中的应用

4.1 小分子气体

小分子气体分离是 PMOFs 应用探索最早且最广泛的应用之一，比如，CO_2、N_2、CH_4、CO、O_2、C_2H_2、SO_2以及二甲苯异构体、苯、环己烷等结构相近小分子[51,59,65-69]。小分子气体分离难点在于目标物尺寸与分子形状极度接近，许多重要“分离对”（如 O_2/N_2、N_2/CO、CH_4/CO_2）的动力学直径差异极小，而且这些分子的极性或偶极矩微弱，主要依赖于更弱的相互作用力进行分离，这为高效吸附剂的开发提出了更高的要求。然而，光敏分子构型转化引起的 MOFs 空间环境与表面性质的微变化，恰好为增强小分子气体吸附分离性能提供了新策略。

C_2H_2是最简单的不饱和烃，其与 CO_2的分子尺寸、形状极为接近（二者动力学直径均为 3.3 Å）且物理性质相似，因此，C_2H_2/CO_2分离难度极大。前文提及的 Wang 等[52]开发了的二芳基乙烯功能化 PMOF $[Zn_2(SDC)_2(BPMTC)]$，当光敏基团二芳基乙烯处于开环态时，孔道含有多个功能位点，增强了 PMOFs 与 C_2H_2的相互作用，如较强的 C–H···π 作用，使其对 C_2H_2的吸附选择性显著高于 CO_2。当二芳基乙烯单元发生周环反应，呈现闭环态时，引发框架结构动态变化，MOFs 孔径收缩，导致 C_2H_2吸附容量与选择性下降，进而可同步实现 C_2H_2的低能耗捕获与释放。Zhang 等[58]也采用光诱导调控 SO_2/N_2分离的思路，结合前人将偶氮苯引入 MOFs 中有利于 CO_2吸附的研究基础，制备了多功能光响应混合基质膜 Pebax/Azo@NH_2-MIL-53（Azo=4-aminoazobenzene），其 SO_2渗透率高达 2570 Barrer，SO_2/N_2选择性达 717，这归因于 NH_2-MIL-53 高的比表面积、较大的孔径、固有的–NH_2以及引入的–N=N–，增强了材料对 SO_2的扩散选择性与亲和性。相较于 N_2，光诱导对 SO_2渗透率改变更大，SO_2渗透率在 2 600~1 900 Barrer 范围内波动，N_2渗透率则在 3.4~6.4 Barrer 区间变化。当偶氮苯呈顺式时，混合基质膜对 SO_2渗透率下降，N_2渗透率上升，导致膜的 SO_2/N_2选择性降低；反之，SO_2与 N_2渗透率呈现相反的变化趋势，使得 SO_2渗透率与 SO_2/N_2选择性同步提升。这意味着该研究通过光驱动调控 MOFs 吸附微环境，初步实现了两种小分子气体分离行为的双向调控。

4.2 无机离子

智能离子吸附分离功能材料的开发对于很多工业分离过程（海水里提锂、处理污水中重金属等）以及自然界中离子传输与活细胞的调节功能研究都具有十分重要的意义。Wang 等[70]受电鳗通过开合离子通道将离子浓度梯度转化为电能的启发，采用原位生长策略制备了嵌入螺吡喃的 PMOFs SP-MIL-53，该材料具有亚纳米通道。此研究通过将螺

吡喃的光驱动异构化作为高度有序亚纳米通道的离子传输开关，实现了精准控制 K^+通量。在紫外光照射下，螺吡喃呈现开环离子形式，亚纳米通道中 K^+的迁移常数为 3.61×10^{-2}，显著高于无光照条件下（闭环中性分子形式）的迁移常数（2.33×10^{-22}），展现出较好的离子选择性。

因钒与铀共存，从海水中选择性提取铀极具挑战性。海水环境中铀主要以 $[UO_2(CO_3)_3]^{4-}$形态存在，其与钒形态 $[H_2VO_4]^-$之间具有显著的几何构型差异，这一特征激发了研究人员调控吸附剂孔径，通过精确尺寸匹配来提升选择性，但是具有尺寸匹配孔隙和配位环境的吸附剂又难以兼容铀的选择性和吸附容量。Pan 等[71]将具有光异构化特性的二芳基乙烯光开关分子通过溶剂辅助配体交换策略分别引入 ZIF-60 和 ZIF-70 中，制备了光响应 ZIFs 吸附剂（PSZ-60、PSZ-70），赋予了 MOFs 载体紫外-可见光驱动下动态可调的孔径与配位环境。这种智能吸附剂可通过动态匹配空间配位从富钒体系中有效提取铀，尤其是 PSZ-70，其铀吸附容量达到 588.24 mg/g，铀与钒的分离因子比高达 215。这一优异的性能归因于二芳基乙烯开环形态时有助于增强传质，从而提升吸附容量。吸附剂孔结构与铀离子之间的尺寸匹配，以及闭环态二芳基乙烯与铀离子之间的空间配位作用，共同促成了优异的铀/钒选择性和铀提取性能。

4.3　染料污染物

染料被广泛应用于纺织业，然而大量染料废物对土壤、水资源等环境介质产生了污染。因此，开发高效的染料吸附剂是十分必要的，用以应对日益严峻的环境与健康问题。目前，研究者主要通过 PMOFs 调控吸附活性位点的“隐藏”与“暴露”以及 MOFs 载体孔径尺寸，以期实现光驱动下染料的高效吸附与脱附。朱竞等[72]用甲基螺吡喃分子（SP-CH_3）和 UiO-66 制备了客体分子嵌入型 PMOFs。经紫外光照后，吸附剂对甲基橙吸附量比可见光诱导下提升了 57.56%，由 26.65 mg/g 提高到 41.99 mg/g。这是因为紫外光诱导 SP-CH_3异构为开环构型，分子两端分别呈 N^+和 O^-离子状态，N^+缺电子内核与阴离子染料甲基橙之间形成静电作用。同时，开环部花菁结构分子偶极矩急剧增大，诱导形成吸附活性位点与甲基橙之间的取向力，从而实现对甲基橙的高效吸附。可见光驱动下 SP-CH_3恢复至闭环构型，与吸附质之间相互作用减弱，有利于脱附过程，脱附量达到 81.6%，进而实现了 MOFs 材料吸附活性位点“隐藏”与“暴露”的光控调节。类似地，Li 等[73]通过混合配体策略成功合成偶氮苯骨架嵌入型的 PMOFs Zn-AzDC/TPA（AzDC=azobenzene-4，4′-dicarboxylic acid，TPA=terephthalic acid）。在黑暗条件下，Zn-AzDC/TPA 对亚甲基蓝（MB）的吸附量高达 513.33 mg/g，而在紫外光照射下，偶氮苯单元发生反式到顺式的异构化，导致材料孔径收缩，进而促使已吸附的 MB 从孔道中释放，释放量可达初始吸附量 44.49%。Zn-AzDC/TPA 在连续 5 次吸附循环后仍保持 93% 以上的去除效率，表现出优异的光诱导循环使用性能。

除上述小分子气体、无机离子、染料污染物外，PMOFs 在复杂生物样品中磷酸化肽选择性富集方面也表现出一定的潜力。Jia 课题组[74]采用以吡啶基两性离子配体（1,1′,1″-(benzene-1,3,5-triyl)tris(methylene)tris(4-carboxypyridinium)tribromide，H_3LBr_3）和 $Zn(NO_3)\cdot6H_2O$ 为光/pH 响应 MOFs 构筑基元，并包覆 Fe_3O_4载体制备了具备光/pH 双重响应磁性 MOFs 复合物（Fe_3O_4@ZW-MOF）。光刺激会影响吡啶衍生物自由基的产生与消失，导致两性离子的电荷梯度发生变化，而两性离子也可通过添加酸或碱调节吸附界面 pH。因此，通过调控光照与 pH 条件即可轻松实现磷酸化肽的可逆捕获与释放。Fe_3O_4@ZW-MOF 在磷酸化肽富集中展现出高灵敏度（检出限达 1 fmol）、高选择性（β-酪蛋白和牛血清白蛋白的质量比为 1∶1 000）和良好的重复使用性（7 次循环），并成功应用于脱脂牛奶与人血清的复杂体系中磷酸化肽的富集，验证了其在磷酸化蛋白质组学分析中的可行性。

5　结论与展望

本文围绕 PMOFs 结构特征以及吸附分离性能的动态调控系统介绍了光敏分子结构及构型转化、PMOFs 结构特征、光诱导 MOFs 载体性质调控与 PMOFs 在吸附分离中的典型应用。目前，主要以偶氮苯类、螺吡喃类、二芳基乙烯类、俘精酸酐类为光诱导分子模型，构筑了一系列骨架接入型、侧基接入型与客体分子嵌入型 PMOFs，通过光诱导可实现孔道尺寸、吸附活性位点、主体相互作用、框架结构等性质的动态调控，并在小分子气体、无机离子、染料污染物吸附分离应用中表现出独特的性能与优势，为智能功能化材料的发展提供了新的研究

思路。

尽管在种类、性质调控以及应用开发等方面 PMOFs 均有一定的进步和发展，但是其在吸附分离领域的核心优势还在不断探索，目前还停留在概念提出与验证的阶段，并面临着一些难题，包括：1）光敏分子构型转化产生的分子机械力与 MOFs 骨架结构的稳定兼容性不足。目前，光敏基团的引入能够维持 MOFs 载体的结构稳定性（如结晶度、孔隙率、热/化学稳定性），但是光诱导循环使用性能方面往往不尽如人意，除光敏分子自身抗光疲劳性因素外，主要归因于循环光异构化带来的分子机械力可能导致 MOFs 局部结构发生微观畸变、相变甚至坍塌。2）光响应效率不足。光敏分子在溶液状态下构型转化速度可以达到秒级，甚至更快，而且构象转化效率几乎达到 90% 以上，但是目前 PMOFs 在长时间光诱导下光致异构化效率依然远低于溶液环境，这可能是因为光诱导穿透深度、构型转化空间位阻、框架诱导激发态构型淬灭等。3）光诱导模式单一，这主要是因为上述提及的 PMOFs 骨架下光敏基团构型转化效率不佳以及速率偏低等。目前，PMOFs 在应用中的光诱导调控模式主要为静态，或者说是只关注光诱导前后光敏分子两种异构化状态下的 PMOFs 性能。在吸附分离领域中，特定波长下光诱导的作用也仅仅体现绿色释放与循环，而且光诱导前后 PMOFs 性能上的差异普遍不明显，停留在“智能材料”概念验证阶段。因此，多样化的光诱导模式，比如，时空维度下的动态诱导，以及吸附分离过程中光诱导作用的深度参与，也许能为 PMOFs 的应用拓展提供新方向。因此，光驱动调控 MOFs 吸附分离如何从当前阶段走向精准调控还需要更多维度的探索，以期实现真正的光驱动智能调控多尺度物质的吸附分离。

参考文献：

[1] Liu Y, Lei Q, Chen J, et al. Appl Surf Sci, 2025, 699: 163128
[2] Habr J J, Alem F E, Kanagavalli P, et al. Sensor Actuator Rep, 2025, 10: 100377
[3] Li J-R, Kuppler R J, Zhou H-C. Chem Soc Rev, 2009, 38(5): 1477
[4] Bloch E D, Queen W L, Krishna R, et al. Science, 2012, 335(6076): 1606
[5] Chen B, Xiang S, Qian G. Acc Chem Res, 2010, 43(8): 1115
[6] Yang X-Q, Yu L-Q, Li L-F, et al. Anal Chim Acta, 2024, 1294: 342293
[7] Ma N, Cai K, Zhao J, et al. Adv Mater, 2025, 37(32): 2503056
[8] Mandal S, Natarajan S, Mani P, et al. Adv Funct Mater, 2021, 31(4): 2006291
[9] Hussain M Z, Yang Z, Huang Z, et al. Adv Sci, 2021, 8(14): 2100625
[10] Li S, Han W, An Q-F, et al. Adv Funct Mater, 2023, 33(38): 2303447
[11] Xu F, Feringa B L. Adv Mater, 2023, 35(10): 2204413
[12] Pardo R, Zayat M, Levy D. Chem Soc Rev, 2011, 40(2): 672
[13] Bandara H M D, Burdette S C. Chem Soc Rev, 2012, 41(5): 1809
[14] An Z, Zhang J-M, Lv M-Y, et al. Anal Chem, 2021, 93(51): 17051
[15] Reineke T M, Eddaoudi M, Moler D, et al. J Am Chem Soc, 2000, 122(19): 4843
[16] Chen Z-F, Xiong R-G, Abrahams B F, et al. J Chem Soc, Dalton Trans, 2001, 17: 2453
[17] Liu Y, Eubank J F, Cairns A J, et al. Angew Chem Int Ed, 2007, 46(18): 3278
[18] Modrow A, Zargarani D, Herges R, et al. Dalton Trans, 2011, 40(16): 4217
[19] Xu Y, Tang Y, Li Q. Adv Funct Mater, 2025, 35(22): 2416359
[20] Sun F, Xiong X, Gao A, et al. Chem Eng J, 2022, 427: 132037
[21] Chen Y, Gao S, Cheng Y, et al. Chem Eur J, 2023, 29(27): e202300222
[22] Shepherd N D, Wang T, Ding B, et al. Inorg Chem, 2021, 60(16): 11706
[23] Küssner K, Listyarini R V, Rödl M, et al. Chem Mater, 2023, 35(17): 6953
[24] Cai T, Lei X, Shang H-B, et al. Anal Chem, 2025, 97(1): 894
[25] Merino E, Ribagorda M. Beilstein J Org Chem, 2012, 8: 1071
[26] Lin Y, Kouznetsova T B, Foret A G, et al. J Am Chem Soc, 2024, 146(6): 3920
[27] Zhao Y, Li Z, Ma J, et al. ACS Appl Mater Interfaces, 2021, 13(47): 55806
[28] Kortekaas L, Browne W R. Chem Soc Rev, 2019, 48(12): 3406
[29] Klajn R. Chem Soc Rev, 2014, 43(1): 148
[30] Wu H, Wu W, Hu L, et al. Chem Eng J, 2023, 469: 143781
[31] Qiu W, Zhang Y, Fu X, et al. Chem Eng J, 2025, 523: 168380
[32] Zhang T, Lou X-Y, Li X, et al. Adv Mater, 2023, 35(11): 2210551
[33] Zou Y, Gao H, Su C, et al. J Polym Res, 2024, 31(2): 34
[34] Foytong W, Pattaweepaiboon S, Pimpathong L, et al. J Photochem Photobiol A, 2024, 453: 115633
[35] Wu Z, Wang W, Qiu L, et al. ACS Appl Mater Interfaces, 2026, 18(3): 6055
[36] Irie M, Mohri M. J Org Chem, 1988, 53(4): 803
[37] Bianco A, Ferrari G, Castagna R, et al. Phys Chem Chem Phys, 2016, 18(45): 31154

[38] Marcon M, Haag C, König B. Beilstein J Org Chem, 2025, 21: 1808
[39] Xu J, Volfova H, Mulder R J, et al. J Am Chem Soc, 2018, 140(33): 10482
[40] Lvov A G, Khusniyarov M M, Shirinian V Z. J Photochem Photobiol C, 2018, 36: 1
[41] Li Z, Zeng X, Gao C, et al. Coord Chem Rev, 2023, 497: 215451
[42] Hou I C-Y, Berger F, Narita A, et al. Angew Chem Int Ed, 2020, 59(42): 18532
[43] Renth F, Siewertsen R, Temps F. Int Rev Phys Chem, 2013, 32(1): 1
[44] Kim Y, Tamaoki N. ChemPhotoChem, 2019, 3(6): 284
[45] Du Y, Huang C-R, Xu Z-K, et al. JACS Au, 2023, 3(5): 1464
[46] Du Y, Liao W-Q, Li Y, et al. Angew Chem Int Ed, 2023, 62(51): e202315189
[47] Mir M A, Banik B K. Inorg Chem Commun, 2025, 174: 113987
[48] Chaturvedi I, Vyas S, Mishra R. Dyes Pigm, 2025, 239: 112748
[49] Zheng Y, Sato H, Wu P, et al. Nat Commun, 2017, 8(1): 100
[50] Furlong B J, Katz M J. J Am Chem Soc, 2017, 139(38): 13280
[51] Nikolayenko V I, Herbert S A, Barbour L J. Chem Commun, 2017, 53(81): 11142
[52] Wang Y-X, Yang S-R, Li G-P, et al. ACS Mater Lett, 2023, 5(11): 3074
[53] Wang Z, Müller K, Valášek M, et al. J Phys Chem C, 2018, 122(33): 19044
[54] Liu Y, Zhao Y, Jiang L. ACS Appl Nano Mater, 2023, 6(19): 17996
[55] Li C, Zhang Z, Heinke L. Langmuir, 2022, 38(43): 13103
[56] Kanj A B, Chandresh A, Gerwien A, et al. Chem Sci, 2020, 11(5): 1404
[57] Park J, Yuan D, Pham K T, et al. J Am Chem Soc, 2012, 134(1): 99
[58] Xin Q, Li S, Ma F, et al. Sep Purif Technol, 2022, 296: 121363
[59] Kim S-Y, Yoon T-U, Kang J H, et al. ACS Appl Mater Interfaces, 2018, 10(32): 27521
[60] Garg S, Schwartz H, Kozlowska M, et al. Angew Chem Int Ed, 2019, 58(4): 1193
[61] Zheng H-Q, Yang Y, Wang Z, et al. Adv Mater, 2023, 35(26): 2300177
[62] Liang H-Q, Guo Y, Peng X, et al. J Mater Chem A, 2020, 8(22): 11399
[63] Qian T, Zhang H, Li X, et al. Angew Chem Int Ed, 2020, 59(31): 13051
[64] Eichler C, Rázková A, Müller F, et al. Chem Mater, 2021, 33(10): 3757
[65] Dang L-L, Zhang X-J, Zhang L, et al. J Coord Chem, 2016, 69(7): 1179
[66] Chen Y, Kong C, Li X, et al. J Mater Chem A, 2025, 13(33): 27618
[67] Fan C B, Le Gong L, Huang L, et al. Angew Chem Int Ed, 2017, 56(27): 7900
[68] Prasetya N, Ladewig B P. J Mater Chem A, 2019, 7(25): 15164
[69] Prasetya N, Ladewig B P. ACS Appl Mater Interfaces, 2018, 10(40): 34291
[70] Liu Y, Chen Y, Guo Y, et al. ACS Nano, 2022, 16(10): 16343
[71] Zhang P, Zhang Y, Wu F, et al. Nat Commun, 2025, 16(1): 2361
[72] Zhu J, Zhong S, Sun L, et al. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2023, 39(8): 1510
朱竞, 钟顺, 孙林, 等. 无机化学学报, 2023,39(8): 1510
[73] Li S, Chai Y, Zhang J, et al. J Saudi Chem Soc, 2024, 28(4): 101880
[74] Wang R, Qi H, Zheng H, et al. Chin Chem Lett, 2024, 35(7): 109215