

离子对受体的功能化应用研究进展

李文莉

浙江师范大学化学与材料科学学院, 浙江 金华

收稿日期: 2026年9月28日; 录用日期: 2026年10月21日; 发布日期: 2026年10月28日

摘要

离子对广泛存在于自然体系、生命过程以及化学环境中, 在离子识别、传输和分离等领域具有重要作用。相比于传统单离子受体, 离子对受体通过同时结合阳离子和阴离子, 利用协同作用实现对离子对的高效识别, 并展现出良好的功能化应用潜力。本文总结了离子对受体在功能化应用的研究进展, 概述离子对受体的结构发展, 并重点阐述其在离子识别与传感、盐溶解与提取、离子运输以及刺激响应体系中的代表性应用, 对当前离子对受体发展面临的挑战以及未来功能化应用方向进行了展望。

关键词

离子对受体, 光响应, 离子识别

Recent Advances in the Functional Applications of Ion-Pair Receptors

Wenli Li

College of Chemistry and Materials Science, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: September 28, 2026; accepted: October 21, 2026; published: October 28, 2026

Abstract

Ion pairs are widely present in natural systems, biological processes, and chemical environments, and play important roles in ion recognition, transport, and separation. Compared with conventional single-ion receptors, ion-pair receptors can simultaneously bind cations and anions and exploit cooperative effects to achieve efficient ion-pair recognition, thereby exhibiting considerable potential for functional applications. This review summarizes recent progress in the functional applications of ion-pair receptors, provides an overview of their structural development, and highlights representative applications in ion recognition and sensing, salt solubilization and extraction, ion transport, and stimuli-responsive systems. Finally, the current challenges in the development of ion-pair receptors and

future directions for their functional applications are discussed.

Keywords

Ion-Pair Receptors, Photoresponsiveness, Ion Recognition

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 背景介绍

阴阳离子广泛参与生命体系、医学、环境和工业过程等多个领域[1]。离子对广泛存在于自然体系中，并由带相反电荷的离子通过静电作用形成，离子对的识别与调控已成为超分子化学领域的重要研究内容[2]。

传统单离子受体通常针对单一离子进行结合，例如冠醚[3] [4]、杯芳烃[5] [6]等结构主要用于阳离子识别，而酰胺、吡咯等含氢键供体体系则广泛应用于阴离子识别[7] [8]。然而，单离子受体在识别过程中需要克服离子与反离子之间的结合能，同时容易受到反离子竞争以及环境因素的影响。离子对受体能够利用阴、阳离子之间静电作用及受体内部的协同效应，提高结合能力和选择性，并为传感、盐分离、离子运输等功能化应用提供新的研究平台。

随着离子对识别研究的发展，离子对受体的结构由异双位点体系逐渐拓展至更复杂的多位点和机械互锁体系，同时卤键[9]-[11]、硫族键[12]及阴离子- π 等非共价作用也被引入离子对识别体系，用于调节受体的结合亲和力与选择性。近年来，光刺激响应单元的引入又进一步赋予离子对受体可逆结合与释放等动态功能。

目前，离子对受体在离子识别与传感[13]-[15]、盐溶解与提取[16]-[19]、跨膜运输[20]-[23]以及光响应体系等领域展现出重要应用前景。因此，本文总结了近年来离子对受体功能化应用方面的最新研究进展，讨论目前存在的问题和挑战，并对其未来发展方向进行了展望。

2. 离子对受体结构的发展概述

近几十年来，已开发出一系列具备高亲和力和选择性的离子对受体，识别基元和受体拓扑结构的种类也逐渐丰富。1991年，Reetz等[24]首次报道了具有离子对识别能力的受体体系。如图1(a)所示，该体系将冠醚阳离子结合单元与Lewis酸性硼中心相结合，其中冠醚用于结合碱金属阳离子，而Lewis酸性硼中心用于结合阴离子，从而实现对离子对的协同识别。该研究被认为是离子对受体领域的起点，为后续通过整合不同离子识别单元构筑离子对受体提供设计思路。

2014年，Knighton和Beer等[25]首次使用一个中性[2]轮烷来结合“轴分离”的碱金属卤化物，如图1(b)所示，其利用以前所未有的轴组件分离离子对结合方式，对碱金属阳离子-卤化物阴离子离子对表现出协同识别。机械互锁结构不仅能够作为离子结合的空间支架，还可通过阳离子诱导的构象调节实现阴、阳离子识别过程的协同增强。

随着研究的深入，研究者进一步通过增加识别位点数量以及构筑更加复杂的空间拓扑结构，发展了多位点及互锁型离子对受体体系。2019年，Williams等[26]利用杯[4]吡咯异双位点受体调控脂溶性酚盐型阳离子交换剂的选择性(图1(c))，该研究表明，通过引入阴离子受体调控阳离子交换剂的反离子结合行为，可进一步改变阳离子交换选择性，为复杂离子体系的协同分离提供了新的思路。

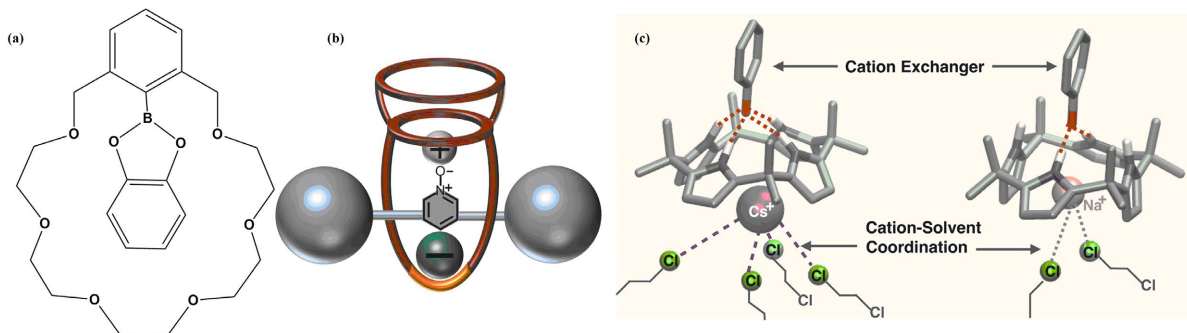


Figure 1. (a) Heteroditopic ion-pair receptor containing a crown ether and a Lewis acidic boron center; (b) Neutral [2]rotaxane ion-pair receptor and its cooperative “axle-separated” ion-pair recognition mode; (c) Calix[4]pyrrole-based composite ion-pair receptor and its cooperative recognition mode

图 1. (a) 冠醚-Lewis 酸性硼中心异双位点离子对受体; (b) 中性[2]轮烷离子对受体及其“轴分离”离子对协同识别模式; (c) 杯[4]吡咯基复合离子对受体及其协同识别模式

总体而言,随着离子对受体由传统异双位点结构逐渐向多位点、机械互锁及复合识别体系发展,其离子结合模式和协同作用方式也更加丰富,为复杂盐体系中的识别、提取与分离提供了更多可能。

3. 离子对受体的功能化应用

离子在生命过程、能源存储及环境化学等领域发挥着重要作用,因此针对离子的选择性识别、分离和调控已成为超分子化学的重要研究方向。具备高选择性和强结合能力的超分子受体已成为离子识别领域的重要研究对象。与此同时,不同结构类型的离子对受体也逐渐拓展至离子识别与传感、离子提取与分离、跨膜运输以及刺激响应等功能化应用。

3.1. 离子识别与传感

将离子对受体与荧光、电化学等信号响应单元相结合,可以将离子结合过程转化为可检测的光学或电化学信号,为构筑具有高选择性和响应特征的离子传感体系提供了新的途径。相比传统单离子传感器,离子对受体能够利用阴、阳离子之间的协同作用,提高识别过程的选择性,并实现多输入响应。

2008 年, Lankshear 等[27]报道了一类基于杯[4]二酮骨架的异双位点离子对受体(如图 2(a)),该体系表现出类似 AND 逻辑的协同离子对识别行为,即受体对完整离子对具有较强结合能力,而对单独存在的“游离”离子几乎不表现出明显亲和力。其部分体系中单独离子几乎不结合,而离子对存在时结合常数可达到 $10^4 \sim 10^5 \text{ M}^{-1}$ 量级;同时,定量协同因子最高达到约 265。这项研究证明了异双位点离子对受体在协同识别完整离子对的优势,为后续离子对传感体系的构筑提供了重要基础。

2017 年, Shin 等[28]等报道了一类基于二苯乙炔构筑的荧光离子对受体。如图 2(b)所示,该受体以二苯乙炔为荧光骨架,并整合阳、阴离子识别位点,实现对 $\text{Na}^+/\text{HSO}_4^-$ 的协同识别与荧光信号输出。与单独加入 Na^+ 或 HSO_4^- 相比,两种离子同时存在时才产生明显的荧光淬灭响应,表现出 AND 逻辑门特征。这种基于离子对协同识别的信号转换模式,不仅提高了离子检测的选择性,也拓展了离子对受体在智能传感体系中的应用。

2021 年, Zaleskaya 等[29]等报道了一类基于大环方酰胺结构的离子对受体荧光传感器(图 2(c)),实现对硫酸盐离子对的选择性识别,并利用离子结合诱导的荧光变化实现传感响应。由于大环结构具有预组织化特征,同时,方酰胺单元能够通过多重氢键作用增强阴离子结合能力,该体系进一步体现了离子对受体在特定阴离子选择性检测中的应用潜力。

2025 年, Wilmore 等[30]等进一步将卤键作用引入离子对受体设计,如图 2(d)所示,报道了一类基于

BODIPY 功能化氮杂冠醚构筑的光学离子对传感体系。该受体通过离子对识别位点以及荧光报告单元的协同作用,实现了对 KCl 等碱金属卤化物离子对以及多种有机铵盐的光学检测。此外,该体系还可用于具有生物相关性的多巴胺盐识别,体现了多重结合位点协同作用对于提高离子对选择性的促进作用。这项研究通过引入卤键等 σ -hole 相互作用,进一步增强阴离子结合能力,为构筑新型高选择性光学离子传感体系提供了新的设计思路。

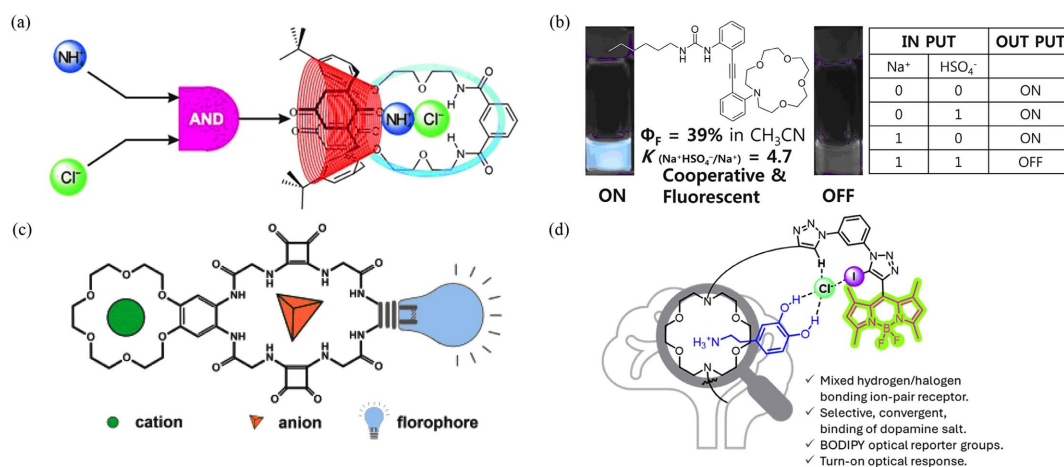


Figure 2. (a) Cooperative AND-type ion-pair recognition and host-guest binding mode; (b) Tolman-based fluorescent receptor for cooperative $\text{Na}^+/\text{HSO}_4^-$ recognition with an AND logic response; (c) Fluorescent ion-pair sensing system integrating cation- and anion-binding sites with a fluorescent reporter; (d) Mixed hydrogen-/halogen-bonding ion-pair receptor bearing a BODIPY optical reporter for the selective recognition of dopamine hydrochloride

图 2. (a) 协同 AND 型离子对识别及其主-客体结合模式; (b) 二苯乙炔基 $\text{Na}^+/\text{HSO}_4^-$ 协同荧光受体及其 AND 逻辑响应; (c) 结合阴、阳离子结合位点与荧光报告单元的离子对荧光传感体系; (d) 含 BODIPY 光学报告单元的混合氢键/卤键离子对受体及其对盐酸多巴胺的选择性识别

综上,离子对受体在传感领域的研究已由早期离子对识别逐渐发展至具有信号响应和功能输出的传感体系。通过调控阴、阳离子结合位点的空间结构,并引入荧光等信号响应单元,离子对受体能够实现由分子识别向功能输出的拓展,为复杂离子体系的选择性检测提供新的方法。

3.2. 盐溶解与提取

在过去十年中,离子对受体作为盐溶解和提取剂的应用取得了较大进展,在固-液提取过程中,目标离子对的晶格能是影响提取行为的重要因素;而水-有机相体系中,受体与离子对的结合还需要与离子水合能相竞争[31]。因此,离子对结合能力并不能单独决定盐的提取效率,在受体设计过程中还需综合考虑结合动力学等因素。目前,已有多种离子对受体被用于碱金属盐的固-液[32]和液-液提取[33],近年来,随着锂资源分离需求的增加,从竞争性碱金属盐体系中实现 Li^+/Li 盐的选择性提取也逐渐成为离子对受体的重要应用方向[34]。2022 年, Kim 等[35]报道了一种四酰胺吡啶基杯[4]芳烃离子对受体,如图 3(a)所示,其中酰胺羰基参与 Li^+ 配位,吡啶 NH 通过氢键结合 Cl^- ,从而实现了对 LiCl 的协同识别。NP5 对 LiCl 的结合常数达到 $3.37 \times 10^2 \text{ M}^{-1}$,并表现出相对于其他碱金属及碱土金属氯化物更高的亲和力。同时固-液提取实验表明,该受体能够促进 LiCl 在有机相中的增溶,并表现出一定的碱金属盐选择性。该体系实现了约 87.8% 的 LiCl 转移/富集响应,而其他竞争离子对的传输显著受限。

随后,2025 年, Hyun Oh 等[36]进一步构建了一种由功能化杯[4]芳烃与杯[4]吡咯组成的离子对受体(图 3(b)),用于 LiCl 的选择性固-液提取。在多种碱金属氯化物共存条件下,该受体仍表现出较高的 LiCl

选择性, 并能够将固态 LiCl 选择性提取至氯仿或二氯甲烷相。尤其是在二氯甲烷中, 其 LiCl 负载率可达到 100%, 且经水相反萃取后 LiCl 能够释放, 受体则保留在有机相中, 为受体的循环利用提供了可能。

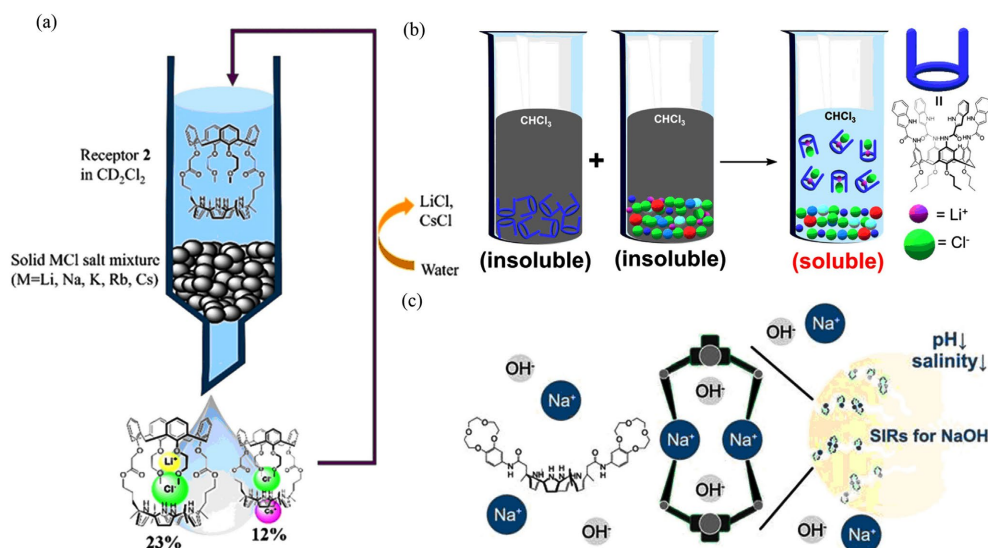


Figure 3. (a) Selective solid–liquid extraction of alkali metal chlorides from mixed salts and subsequent back-extraction; (b) Calix[4]arene-based ion-pair receptor for selective solubilization and extraction of LiCl into the organic phase; (c) Ion-pair receptor-mediated NaOH extraction and immobilized separation system

图 3. (a) 离子对受体对混合碱金属氯化物的选择性固–液提取及反萃取过程; (b) 杯[4]芳烃型离子对受体促进 LiCl 在有机相中的选择性增溶与提取; (c) 离子对受体用于 NaOH 提取及其固定化分离体系

离子对受体还被进一步用于其他高水合无机盐的直接提取。2023 年, Hwang 等[37]报道了一系列基于杯[4]吡咯构筑的离子对受体(如图 3(c)), 用于 NaOH 的选择性提取。该受体能够同时结合 Na⁺和 OH⁻, 其中 cis-1 与 NaOH 形成稳定的二聚超分子复合物。在液–液提取实验中, cis-2 和 trans-2 均可将 NaOH 由 pH = 11.01 的水相转移至甲苯相, 在受体与 NaOH 等摩尔条件下提取效率达到约 50%~60%。该研究证明离子对受体不仅能够用于传统盐类的选择性萃取, 还可通过固定化等方式拓展至强碱性水相体系, 为高水合离子对的直接分离提供了新的途径。

综上, 离子对受体在盐溶解与提取领域的应用由盐增溶逐渐发展至复杂竞争体系中的选择性分离。通过离子对结合位点的协同作用, 受体能够促进目标盐由固相或水相向有机相转移, 并实现对特定离子对的选择性提取, 为锂盐及其他高水合无机盐的分离提供了新的途径。

3.3. 跨膜运输

生物体系中, 离子通过天然离子载体或膜蛋白进行选择性跨膜运输, 是维持细胞离子稳态和正常生理功能的重要过程, 而离子运输异常则与囊性纤维化等多种疾病密切相关。因此, 能够同时识别阴、阳离子的离子对受体被逐渐用于人工跨膜运输体系。通过对阴、阳离子结合位点及受体脂溶性的合理设计, 这类受体能够在膜界面结合目标离子对, 并将其转运至膜的另一侧, 从而表现出一定的运输效率和离子选择性。目前, 已有部分离子对受体在脂质体模型膜中表现出跨膜离子运输能力, 为人工离子载体的设计及其潜在在生物医学应用提供新的研究方向。

2023 年, 华中师范大学李海兵团队[38]构建了一种氨基柱[5]芳烃(NP5)修饰的仿生离子对受体纳米通道, 用于 Li⁺的选择性转运与富集。如图 4(a)所示, NP5 通过氨基链与 Cl⁻形成氢键, 并利用富电子空腔与 Li⁺发生阳离子– π 相互作用, 从而实现 LiCl 离子对的协同识别。在电场驱动下, NP5 功能化 PET 纳

米通道表现出明显的 Li^+ 运输选择性, 显著高于未修饰通道。利用光响应实验表明, 365 nm 光照仅需 5 s 即可使体系达到 $E/Z = 20:80$ 的光稳态; 随后经 450 nm 光照 9 min 或 500 nm 光照 14 min, 可分别恢复至 $E/Z = 82:18$ 和 $91:9$ 。该分子在连续 4 次光异构化循环后未观察到明显光降解, 并且 Na^+/Cl^- 跨膜运输的 OFF-ON 功能在连续 3 次光循环后仍可保持, 体现出良好的光化学稳定性和功能可逆性。

此外, 作者进一步开展了相关应用验证, 表明该仿生纳米通道在 Li^+ 选择性富集方面具有一定的应用潜力。

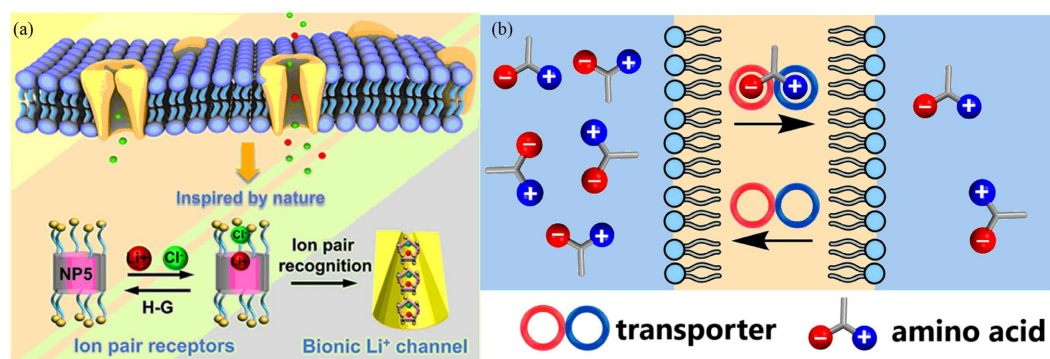


Figure 4. (a) Biomimetic Li^+ nanochannel functionalized with an aminopillar[5]arene ion-pair receptor for selective ion transport; (b) Ditopic ion-pair receptor-mediated cotransport of ion pairs and amino acids across a phospholipid bilayer

图 4. (a) 氨基柱[5]芳烃离子对受体修饰的仿生 Li^+ 纳米通道及其选择性运输过程; (b) 双位点离子对受体介导的离子对及氨基酸跨磷脂双层协同运输模式

2025 年, Zaleskaya-Hernik 等[39]构建了一系列含方酰胺阴离子结合单元和 18-冠-6 阳离子结合位点的双位点离子对受体。该类受体能够协同结合 KCl , 并在脂质体模型膜中促进 K^+/Cl^- 跨膜运输。如图 4(b) 所示, 其受体还可促进甘氨酸、丝氨酸、谷氨酸和精氨酸等极性氨基酸跨越磷脂双层, 其中还包括谷氨酸和精氨酸等具有带电侧链的极性氨基酸。该研究证明离子对受体不仅能够用于无机盐的跨膜协同运输, 还可进一步拓展至生物相关两性离子的跨膜转运。

综上, 离子对受体已由无机盐的选择性跨膜运输进一步拓展至生物相关两性离子的转运。通过合理调节结合位点及受体脂溶性, 可提高离子跨膜运输效率和选择性, 为人工离子载体及仿生运输体系的构筑提供新的思路。

3.4. 光响应性体系

光作为一种非侵入性外部刺激, 具有易于控制、响应快速和可远程操作等特点, 因此被广泛用于构筑刺激响应型超分子体系。将光响应单元引入离子对受体后, 可通过光诱导的构型或构象变化改变阴、阳离子结合位点的空间排列及结合能力, 从而实现对离子对识别、结合和释放过程的可逆调控。相较于传统离子对受体, 光响应体系能够进一步赋予受体可开关的结合行为, 并为离子提取、运输及刺激响应材料等功能应用提供新的途径。

2018 年, Kokan 等[40]首次报道了一种光开关型异双位点离子对受体。如图 5(a)所示, 该受体以酰胺单元作为光响应开关, 并结合 2,6-吡啶二酰胺阴离子识别位点, 通过 E/Z 异构化同步调节阴、阳离子结合能力。 E 构型能够协同结合 LiBr 等离子对, 而经紫外光诱导形成 Z 构型后, 分子内氢键使受体转变为弱结合状态, 从而实现离子对识别的“ON/OFF”切换。该工作为利用光刺激可逆控制离子对结合与释放提供了典型范例。

2024 年, Chattopadhyay 等[41]等进一步报道了一种基于酰胺结构的可逆光响应离子对载体(如图

5(b)), 实现了 Na^+ 和 Cl^- 的光控协同跨膜运输, 并实现 Na^+ 和 Cl^- 运输的可逆 “OFF-ON” 调控。该研究将光响应离子对受体由早期的可逆结合与释放进一步拓展至膜环境中的可控离子协同运输, 体现光响应离子对受体在动态跨膜运输功能的应用前景。

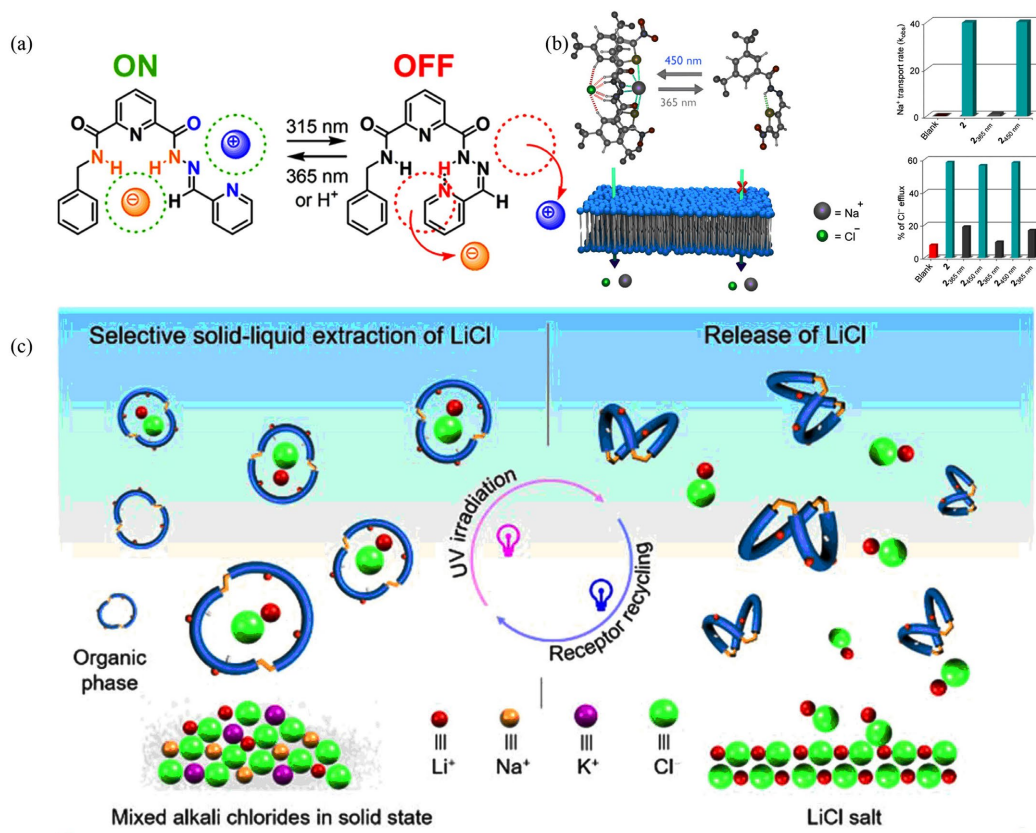


Figure 5. (a) Light-induced ON/OFF switching of ion-pair recognition; (b) Reversible photoresponsive ion-pair carrier for Na^+ / Cl^- cotransport across a lipid bilayer; (c) Photoresponsive macrocyclic ion-pair receptor for selective solid-liquid extraction and controlled release of LiCl

图 5. (a) 光诱导构型变化调控离子对识别的 ON/OFF 切换; (b) 可逆光响应离子对载体介导的 Na^+ / Cl^- 跨膜协同运输; (c) 光响应大环离子对受体对 LiCl 的选择性固-液提取与可控释放

2026 年, 四川大学袁立华团队[42]报道一种基于偶氮苯桥连氢键芳酰胺大环的光响应离子对受体。如图 5(c)所示, 该受体在同一大环空腔内设置了由酰胺氧构成的阳离子结合位点和酰胺 N-H 键构成的阴离子结合位点, 并利用偶氮苯单元的光致异构化调节空腔结构, 从而实现离子对的光控捕获与释放。此外, 固-液提取实验表明, *E,E* 构型能够从 NaCl 、 KCl 、 RbCl 和 CsCl 等竞争盐中选择性提取 LiCl , 而紫外光诱导形成 *Z,Z* 构型后, LiCl 的提取效率显著降低; 光照后, 已提取 LiCl 的释放比例最高可达 77%。

综上, 光响应离子对受体由早期对离子对结合与释放的可逆调控, 逐渐拓展至光控跨膜运输和选择性盐提取等功能应用。其通过将酰肼、偶氮苯等光响应单元与阴、阳离子结合位点相结合, 可利用光诱导异构化改变受体的构型、空腔尺寸及结合位点空间排列, 从而实现离子对识别、运输和提取过程的动态调节。

4. 总结与展望

离子对识别是在阳离子和阴离子识别研究的基础上逐步发展起来的, 近年来已成为超分子化学中相

对成熟且活跃的研究领域。随着离子对识别体系中引入卤键、硫族键等新型非共价作用,机械互锁型主体的出现以及受体结构由异双位点向多位点体系的不断拓展,离子对受体的结构复杂性和功能多样性均得到明显提升。

尽管离子对受体在识别、提取和运输等方面已经取得较大进展,但多数体系仍主要在有机溶剂、模型膜或较理想的实验条件下开展研究,在复杂竞争介质、水相环境以及实际分离体系中的选择性和稳定性仍有待提高。同时,离子对结合能力并不能单独决定功能表现,离子的晶格能、水合能以及受体和复合物的脂溶性等因素仍需综合考虑。总之,未来仍需发展兼具高选择性、高稳定性和可循环利用能力的离子对受体,并进一步构筑具有可逆刺激响应功能的离子识别、提取和运输体系。特别是开发可见光及长波长光调控的离子对受体,将为离子选择性分离、跨膜运输及智能超分子材料的发展提供新的机遇。

参考文献

- [1] Evans, N.H. and Beer, P.D. (2014) Advances in Anion Supramolecular Chemistry: From Recognition to Chemical Applications. *Angewandte Chemie International Edition*, **53**, 11716-11754. <https://doi.org/10.1002/anie.201309937>
- [2] Wagay, S.A., Khan, L. and Ali, R. (2023) Recent Advancements in Ion-Pair Receptors. *Chemistry—An Asian Journal*, **18**, e202201080. <https://doi.org/10.1002/asia.202201080>
- [3] Kwan, C., Walther, A., Mikherdov, A.S., Holstein, J.J., Drechsler, C. and Clever, G.H. (2025) Dual Cation/Anion Binding in Crown Ether-Based Coordination Cages. *Journal of the American Chemical Society*, **148**, 3230-3239. <https://doi.org/10.1021/jacs.5c17231>
- [4] Yoo, C., Dodge, H.M. and Miller, A.J.M. (2019) Cation-Controlled Catalysis with Crown Ether-Containing Transition Metal Complexes. *Chemical Communications*, **55**, 5047-5059. <https://doi.org/10.1039/c9cc00803a>
- [5] Fernández-Rosas, J., Gómez-González, B., Pessêgo, M., Rodríguez-Dafonte, P., Parajó, M. and Garcia-Rio, L. (2016) Comparison of Pillar[5]Arene and Calix[4]Arene Anion Receptor Ability in Aqueous Media. *Supramolecular Chemistry*, **28**, 464-474. <https://doi.org/10.1080/10610278.2015.1120302>
- [6] Salorinne, K. and Nissinen, M. (2008) Calixcrowns: Synthesis and Properties. *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, **61**, 11-27. <https://doi.org/10.1007/s10847-008-9411-y>
- [7] Brown, A. and Beer, P.D. (2016) Halogen Bonding Anion Recognition. *Chemical Communications*, **52**, 8645-8658. <https://doi.org/10.1039/c6cc03638d>
- [8] Gale, P.A., Howe, E.N.W. and Wu, X. (2016) Anion Receptor Chemistry. *Chem*, **1**, 351-422. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2016.08.004>
- [9] Zhou, L., Lu, Y., Xu, Z., Peng, C. and Liu, H. (2018) Ion-Pair Recognition Based on Halogen Bonding: A Case of the Crown-Ether Receptor with Iodo-Trizole Moiety. *Structural Chemistry*, **29**, 533-540. <https://doi.org/10.1007/s11224-017-1050-8>
- [10] Munasinghe, V.K., Pancholi, J., Manawadu, D., Zhang, Z. and Beer, P.D. (2022) Mechanical Bond Enhanced Lithium Halide Ion-Pair Binding by Halogen Bonding Heteroditopic Rotaxanes. *Chemistry—A European Journal*, **28**, e202201209. <https://doi.org/10.1002/chem.202201209>
- [11] Luo, J., Ao, Y., Malm, C., Hunger, J., Wang, Q. and Wang, D. (2018) Tritopic Ion-Pair Receptors Based on Anion- π Interactions for Selective CaX_2 Binding. *Dalton Transactions*, **47**, 7883-7887. <https://doi.org/10.1039/c8dt01727a>
- [12] Bunchuay, T., Docker, A., Eiamprasert, U., Surawatanawong, P., Brown, A. and Beer, P.D. (2020) Chalcogen Bond Mediated Enhancement of Cooperative Ion-Pair Recognition. *Angewandte Chemie International Edition*, **59**, 12007-12012. <https://doi.org/10.1002/anie.202001125>
- [13] Zaleskaya, M., Jaglencic, D., Karbarz, M., Dobrzycki, L. and Romański, J. (2020) Squaramide Based Ion Pair Receptors Possessing Ferrocene as a Signaling Unit. *Inorganic Chemistry Frontiers*, **7**, 972-983. <https://doi.org/10.1039/c9qi01452g>
- [14] Frontera, A., Orell, M., Garau, C., Quiñonero, D., Molins, E., Mata, I., *et al.* (2005) Preparation, Solid-State Characterization, and Computational Study of a Crown Ether Attached to a Squaramide. *Organic Letters*, **7**, 1437-1440. <https://doi.org/10.1021/ol0474608>
- [15] Brunetti, E., Picron, J., Flidrova, K., Bruylants, G., Bartik, K. and Jabin, I. (2014) Fluorescent Chemosensors for Anions and Contact Ion Pairs with a Cavity-Based Selectivity. *The Journal of Organic Chemistry*, **79**, 6179-6188. <https://doi.org/10.1021/jo5009146>
- [16] Jaglencic, D., Wilczek, M. and Romański, J. (2021) Tripodal, Squaramide-Based Ion Pair Receptor for Effective

- Extraction of Sulfate Salt. *Molecules*, **26**, Article 2751. <https://doi.org/10.3390/molecules26092751>
- [17] Sadhu, B., Sundararajan, M., Velmurugan, G. and Venuvanalingam, P. (2015) Elucidating the Structures and Cooperative Binding Mechanism of Cesium Salts to the Multitopic Ion-Pair Receptor through Density Functional Theory Calculations. *Dalton Transactions*, **44**, 15450-15462. <https://doi.org/10.1039/c5dt01095k>
 - [18] He, Q., Zhang, Z., Brewster, J.T., Lynch, V.M., Kim, S.K. and Sessler, J.L. (2016) Hemispherand-Strapped Calix[4]pyrrole: An Ion-Pair Receptor for the Recognition and Extraction of Lithium Nitrite. *Journal of the American Chemical Society*, **138**, 9779-9782. <https://doi.org/10.1021/jacs.6b05713>
 - [19] Williams, N.J., Seipp, C.A., Garrabrant, K.A., Custelcean, R., Holguin, E., Keum, J.K., *et al.* (2018) Surprisingly Selective Sulfate Extraction by a Simple Monofunctional Di(Imino)Guanidinium Micelle-Forming Anion Receptor. *Chemical Communications*, **54**, 10048-10051. <https://doi.org/10.1039/c8cc05115a>
 - [20] Koulov, A.V., Mahoney, J.M. and Smith, B.D. (2003) Facilitated Transport of Sodium or Potassium Chloride across Vesicle Membranes Using a Ditopic Salt-Binding Macrobicycle. *Organic & Biomolecular Chemistry*, **1**, 27-29. <https://doi.org/10.1039/b208873h>
 - [21] Park, I., Yoo, J., Kim, B., Adhikari, S., Kim, S.K., Yeon, Y., *et al.* (2012) Oligoether-Strapped Calix[4]pyrrole: An Ion-Pair Receptor Displaying Cation-Dependent Chloride Anion Transport. *Chemistry—A European Journal*, **18**, 2514-2523. <https://doi.org/10.1002/chem.201103239>
 - [22] Lee, J.H., Lee, J.H., Choi, Y.R., Kang, P., Choi, M. and Jeong, K. (2014) Synthetic K⁺/Cl⁻-Selective Symporter across a Phospholipid Membrane. *The Journal of Organic Chemistry*, **79**, 6403-6409. <https://doi.org/10.1021/jo501145z>
 - [23] Tong, C.C., Quesada, R., Sessler, J.L. and Gale, P.A. (2008) Meso-Octamethylcalix[4]pyrrole: An Old Yet New Transmembrane Ion-Pair Transporter. *Chemical Communications*, **44**, 6321-6323. <https://doi.org/10.1039/b814988g>
 - [24] Reetz, M.T., Niemeyer, C.M. and Harms, K. (1991) Crown Ethers with a Lewis Acidic Center: A New Class of Heterotopic Host Molecules. *Angewandte Chemie International Edition in English*, **30**, 1472-1474. <https://doi.org/10.1002/anie.199114721>
 - [25] Knighton, R.C. and Beer, P.D. (2014) Axle Component Separated Ion-Pair Recognition by a Neutral Heteroditopic [2]Rotaxane. *Chem. Commun.*, **50**, 1540-1542. <https://doi.org/10.1039/c3cc48905a>
 - [26] Williams, N.J., Roy, S., Reynolds, C.O., Custelcean, R., Bryantsev, V.S. and Moyer, B.A. (2019) Enhancing Selectivity of Cation Exchange with Anion Receptors. *Chemical Communications*, **55**, 3590-3593. <https://doi.org/10.1039/c9cc00287a>
 - [27] Lankshear, M.D., Dudley, I.M., Chan, K., Cowley, A.R., Santos, S.M., Felix, V., *et al.* (2008) Cooperative and Ion-Pair Recognition by Heteroditopic Calix[4]diquinone Receptors. *Chemistry—A European Journal*, **14**, 2248-2263. <https://doi.org/10.1002/chem.200701347>
 - [28] Shin, J., Hong, J., Ko, M. and Cho, D. (2017) Fluorescent and Cooperative Ion Pair Receptor Based on Tolan for Na⁺ (or Li⁺) and HSO₄⁻: Logic and Gate. *Chem. Commun.*, **53**, 11414-11417. <https://doi.org/10.1039/c7cc06907c>
 - [29] Zaleskaya, M., Jaglencic, D. and Romański, J. (2021) Macrocyclic Squaramides as Ion Pair Receptors and Fluorescent Sensors Selective towards Sulfates. *Dalton Transactions*, **50**, 3904-3915. <https://doi.org/10.1039/d0dt04273k>
 - [30] Wilmore, J.T., Taylor, A.J., Marques, I., Félix, V. and Beer, P.D. (2025) A Halogen Bonding Bodipy-Appended Aza-Crown Ether for Selective Optical Sensing of Inorganic and Organic Ion-Pair Species. *Chemical Science*, **16**, 19271-19279. <https://doi.org/10.1039/d5sc05033b>
 - [31] McConnell, A.J., Docker, A. and Beer, P.D. (2020) From Heteroditopic to Multitopic Receptors for Ion-Pair Recognition: Advances in Receptor Design and Applications. *ChemPlusChem*, **85**, 1824-1841. <https://doi.org/10.1002/cplu.202000484>
 - [32] Akhuli, B. and Ghosh, P. (2015) Selective Recognition and Extraction of KBr via Cooperative Interactions with a Urea Functionalized Crown Ether Dual-Host. *Chemical Communications*, **51**, 16514-16517. <https://doi.org/10.1039/c5cc07291c>
 - [33] Zakrzewski, M., Kwietniewska, N., Walczak, W. and Piątek, P. (2018) A Non-Multimacrocyclic Heteroditopic Receptor That Cooperatively Binds and Effectively Extracts KAcO Salt. *Chemical Communications*, **54**, 7018-7021. <https://doi.org/10.1039/c8cc03395a>
 - [34] He, Q., Williams, N.J., Oh, J.H., Lynch, V.M., Kim, S.K., Moyer, B.A., *et al.* (2018) Selective Solid-Liquid and Liquid-Liquid Extraction of Lithium Chloride Using Strapped Calix[4]pyrroles. *Angewandte Chemie International Edition*, **57**, 11924-11928. <https://doi.org/10.1002/anie.201805127>
 - [35] Kim, S.H., Yeon, Y., Lee, A., Lynch, V.M., He, Q., Sessler, J.L., *et al.* (2022) Tetraamidoindolyl Calix[4]arene as a Selective Ion Pair Receptor for LiCl. *Organic Chemistry Frontiers*, **9**, 6888-6893. <https://doi.org/10.1039/d2qo01519f>
 - [36] Hyun Oh, J., Joong Kim, M., Choi, J., Chan Jeong, H. and Kuk Kim, S. (2025) An Ion Pair Receptor for Selective Solid-Liquid Extraction of LiCl. *Chemistry—A European Journal*, **31**, e202403868. <https://doi.org/10.1002/chem.202403868>

-
- [37] Hwang, I., Huang, S., Smith, S., Lynch, V., Custelcean, R., Moyer, B.A., *et al.* (2023) Direct Extraction of Sodium Hydroxide by Calix[4]pyrrole-Based Ion-Pair Receptors. *Journal of the American Chemical Society*, **145**, 14387-14394. <https://doi.org/10.1021/jacs.3c03547>
- [38] Li, G., Wang, Y., Luan, H., Sun, Y., Qu, Y., Lu, Z., *et al.* (2023) Highly Selective Transport and Enrichment of Lithium Ions through Bionic Ion Pair Receptor Nanochannels. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **15**, 32753-32761. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c05776>
- [39] Zaleskaya-Hernik, M., Salam, R., González, M.J., Wilczek, M., Dobrzycki, Ł., Busschaert, N., *et al.* (2025) Squaramide-Based Ion Pair Receptors Can Facilitate Transmembrane Transport of KCl and Zwitterions Including Highly Polar Amino Acids. *Chemical Science*, **16**, 6982-6990. <https://doi.org/10.1039/d5sc00866b>
- [40] Kokan, Z. and Chmielewski, M.J. (2018) A Photoswitchable Heteroditopic Ion-Pair Receptor. *Journal of the American Chemical Society*, **140**, 16010-16014. <https://doi.org/10.1021/jacs.8b08689>
- [41] Chattopadhyay, S., Wanjari, P. and Talukdar, P. (2024) Acylhydrazone-Based Reversibly Photoswitchable Ion Pair Transporter with OFF-ON Cotransport Activity. *Chemical Science*, **15**, 17017-17025. <https://doi.org/10.1039/d4sc02474e>
- [42] Fu, K., Liu, H., Mai, X., Yang, Z., Tao, M., Qin, S., *et al.* (2026) A Photoswitchable Macrocyclic Ion-Pair Receptor. *Organic Chemistry Frontiers*, **13**, 3628-3636. <https://doi.org/10.1039/d6qo00250a>