

引用本文: 安博帆, 王雪芬. 黄原胶/苯丙氨酸插层LDH复合气凝胶的制备及其对马尿酸吸附性能的研究 [J]. 离子交换与吸附, 2026, 42(4): 251-259.

Citation: AN Bo-fan, WANG Xue-fen. Preparation of Xanthan Gum/Phenylalanine-Intercalated LDH Composite Aerogel and Its Adsorption Performance for Hippuric Acid [J]. Ion Exchange and Adsorption, 2026, 42(4): 251-259.

文章编号: 1001-5493(2026)04-0251-09

DOI: 10.16026/j.cnki.ica.2026040251

黄原胶/苯丙氨酸插层LDH复合气凝胶的制备及其对马尿酸吸附性能的研究*

安博帆, 王雪芬**

(东华大学先进纤维材料全国重点实验室, 东华大学材料科学与工程学院, 上海 201620)

摘要: 为高效去除透析液中积累的毒素, 采用共沉淀法分别制备天冬氨酸 (Asp)、谷氨酸 (Glu)、苯丙氨酸 (Phe) 插层的层状双金属氢氧化物 (LDH), 并考察其对马尿酸 (HA) 的吸附性能。结果表明, Phe-LDH 性能最优, 吸附量达 196.8 mg/g。在此基础上, 使用冷冻干燥法制备 XG/Phe-LDH 复合气凝胶 (XG/PL)。优化后的复合气凝胶对 HA 的最大吸附量为 149 mg/g, 吸附行为符合 Langmuir 等温模型和准二级动力学模型, 表现为单层均相化学吸附。机理分析证实, XG/PL 的高效吸附能力主要归因于 Phe-LDH 的层间离子置换机制。

关键词: 层状双金属氢氧化物, 氨基酸, 气凝胶, 吸附

中图分类号: O647.3 **文献标志码:** A

1 前言

慢性肾脏病 (CKD) 已成为威胁人类健康的全球性问题^[1]。由于代谢功能受损, 患者体内各种尿毒症毒素蓄积, 进而引起心血管、神经等系统功能障碍^[2-3]。尿毒症毒素可分为小分子、中分子和蛋白结合尿毒症毒素 (PBUTs)^[4-5]。以马尿酸 (HA) 为代表的 PBUTs 属于低分子量疏水化合物, 在生理状态下带负电荷, 可与人血清白蛋白 (HSA) 结合, 因此在常规血液透析中难以被有效清除^[6-7]。研究发现, 若将透析液中的游离毒素浓度维持在较低水平, 可促进蛋白-毒素结合平衡向解离方向移动, 从而促进 PBUTs 不断从血浆转移至透析液中^[8-9]。因此, 在透析液中引入高效吸附剂, 有望提高 PBUTs 清除效率。

基于上述思路, 研究者们致力于开发 PBUTs

吸附剂。Shi 等^[10]在常规透析液中加入结合剂, 提高了 PBUTs 的清除率。Li 等^[11]以环糊精聚合物为吸附剂, 实现了透析液中 PBUTs 的有效去除。Ding 等^[12]通过水热法制备花状层状双金属氢氧化物 (LDH) 纳米片, 并经煅烧获得具有可拉伸纳米孔的层状双金属氧化物 (LDO), 初步展示了 LDH 基材料吸附 PBUTs 的潜力。但现有 PBUTs 吸附剂仍存在制备工艺繁琐、吸附性能不足等问题^[11, 13]。

LDH 为一类二维纳米片, 其由带正电荷的主体层板与层间阴离子组成^[14]。LDH 可容纳多种类型的阴离子客体, 但其层间阴离子置换遵循明确的选择性顺序, 即电负性较强的阴离子可置换电负性较弱的阴离子。常见的无机阴离子如 NO_3^- 、 CO_3^{2-} 等因电负性较强, 难以吸附电负性较弱的污染物^[15]。氨基酸属于典型的两性电解质, 其带电性质会随着环境 pH 值的变化而

* 收稿日期: 2026-03-25

基金项目: 上海市自然科学基金 (项目号 22ZR1402100); 国家重点研发计划 (项目号 2022YFB3804901, 2022YFB3804900)。

作者简介: 安博帆 (2001—), 女, 硕士研究生。

**通信作者: 王雪芬, E-mail: wangxf@dhu.edu.cn。

变化^[16-17]。利用该特点,结合共沉淀法制备LDH所需的碱性环境,可将带负电的氨基酸分子作为阴离子源引入层间。

本研究采用共沉淀法,分别引入天冬氨酸(Asp)、谷氨酸(Glu)和苯丙氨酸(Phe),制备了一系列氨基酸插层LDH。随后,将其引入以黄原胶(XG)为骨架、环氧氯丙烷(EHC)为交联剂的气凝胶结构中。通过吸附实验,评估复合气凝胶对HA的吸附性能,并阐明其潜在吸附机理。本研究为开发高性能、可调控的PBUTs吸附剂提供了新的设计思路。

2 实验部分

2.1 试剂和仪器

试剂:六水硝酸镁($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、九水硝酸铝($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)、氢氧化钠(NaOH)、硝酸钠(NaNO_3),国药集团化学试剂有限公司;天冬氨酸(Asp)、谷氨酸(Glu)、苯丙氨酸(Phe),东京化成工业株式会社;马尿酸(HA),Sigma Aldrich试剂公司;水合茚三酮,安耐吉化学公司;乙酸、乙醇,上海泰坦科技有限公司;黄原胶(XG),上海罗恩试剂有限公司;环氧氯丙烷(ECH),上海阿拉丁生化科技股份有限公司;去离子水,自制。所有试剂均为分析纯,未经进一步纯化。

仪器:场发射扫描电子显微镜(FE-SEM),Gemini 560,德国ZEISS公司;X射线衍射仪(XRD),Bruker D8;衰减全反射傅里叶变换红外光谱(ATR-FT-IR),Nicolet-8700,美国Thermo Fisher公司;紫外-可见分光光度计(UV),TU-1950,北京普析通用仪器有限责任公司。

2.2 氨基酸插层LDH的制备

A溶液:0.01 mol六水硝酸镁与0.005 mol九水硝酸铝溶于150 mL去离子水;B溶液:0.0075 mol氨基酸(Asp、Glu或Phe)溶于75 mL去离子水。将A溶液滴加到B溶液中,并用NaOH溶液调节pH至9.5~10.5。滴加过程中持续通入氮气鼓泡,以排除空气干扰。随后于80 °C下静置24 h,将所得产物洗涤并干燥。为便于后续分析,将氨基酸插层LDH分别标记为Asp-LDH、Glu-LDH和Phe-LDH。

2.3 黄原胶/氨基酸插层LDH复合气凝胶的制备

将1.5 g黄原胶分散于98.5 g去离子水中,得到XG溶液。取10 g XG溶液,依次加入不同质量(0、0.15、0.30 g)的LDH,并加入135 μL 环氧氯丙烷作为交联剂。将溶液置于60 °C交联24 h后冷冻干燥,得到复合气凝胶。以Phe-LDH为例,根据LDH与XG的质量比($x=0、2、4$),将样品标记为XG/PL x 。实验流程图如图1所示。



图1 实验流程图。

Figure 1 Experimental flowchart.

2.4 吸附实验

为测定HA在吸附剂上的平衡吸附量,将10 mg吸附剂与10 mL HA溶液混合,于25 °C、120 r/min下振荡24 h至吸附平衡,并根据式(1)计算吸附量:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{W} \quad (1)$$

式中: C_0 、 C_e 分别为HA的初始浓度和吸附平衡

后HA的浓度,mg/L; V 为体积,L; W 为吸附剂质量,g。

Langmuir和Freundlich等温线模型的表达式如式(2)和(3)所示:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_0} + \frac{1}{K_L q_0} \quad (2)$$

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (3)$$

式中: q_e 为平衡吸附容量, mg/g; q_0 为最大吸附量, mg/g; K_L 为 Langmuir 常数, L/mg; K_F 为 Freundlich 常数, mg/g。

为探究 HA 随时间的吸附行为, 采用初始浓度为 300 mg/L 的 HA 溶液进行动力学研究。在 25 °C 下, 将 10 mg 吸附剂与 10 mL HA 溶液置于恒温振荡器中, 以 120 r/min 的转速振荡。按预定时间间隔取样, 吸附量的测定方式与前文一致。

准一级和准二级动力学模型分别如式 (4) 和 (5) 所示:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (4)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (5)$$

式中: q_t 为 t 时刻的吸附量, mg/g; k_1 为准一级动力学模型速率常数, h^{-1} ; k_2 为准二级动力学模型速率常数, g/(mg·h)。

2.5 吸附再生实验

将 20 mg 复合气凝胶加入 20 mL 初始浓度为 20 mg/L 的 HA 溶液中, 于 25 °C 下吸附 12 h。配制 30% (v/v) 甲醇和 0.2 mol/L $NaNO_3$ 的混合溶液作为洗脱剂, 对吸附剂进行洗脱处理。洗脱结束后用蒸馏水洗涤, 以除去残留的洗脱液。使用再生后的吸附剂进行下一轮循环吸附实验, 共重复 6 次。HA 去除率由式 (6) 计算:

$$R_e = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中: R_e 为 HA 去除率, %; C_0 为 HA 初始浓度, mg/L; C_e 为吸附后溶液中残存 HA 浓度, mg/L。

2.6 氨基酸显色实验

在固液比 1:1 条件下, 分别将 Asp-LDH、Glu-LDH 及 Phe-LDH 加入 HA 溶液中, 于恒温振荡器中接触 12 h 以达到吸附平衡。吸附结束后取上清液, 经 0.1 μm 滤膜过滤, 得到的滤液为待测样品。

茚三酮显色反应操作如下: 称取 0.1 g 水合茚三酮溶于 100 mL 无水乙醇中, 配制成 0.1% (w/v) 显色液, 加入 1 mL 乙酸以提高溶液的稳定性。用毛细管点样法将待测样品液点于滤纸上, 斑点直径为 4~6 mm。将点样后的滤纸短暂浸入茚三酮显色液中, 取出并于 100 °C 加热 10 min, 观察并记录显色情况。

3 结果与讨论

3.1 氨基酸插层 LDH 的形貌特征及表征分析

为了研究氨基酸插层对 LDH 形貌结构的影响, 采用 SEM 对样品的微观形貌进行表征, 结果如图 2(a)~(d) 所示。 NO_3^- -LDH 呈典型片状结构, 纳米片层相互堆叠; 氨基酸插层样品 (Asp-LDH、Glu-LDH、Phe-LDH) 表面形貌与 NO_3^- -LDH 基本相同, 均保持片状堆叠结构。该结果说明氨基酸分子的引入未破坏 LDH 的层状结构, 插层改性后材料仍完整保留了主体层板的形貌特征。

使用 XRD 对样品晶体结构进行表征。由图 2(e) 可知, NO_3^- -LDH 在 9.91° 处出现对应 (003) 晶面的衍射峰, 经计算其层间距为 8.89 Å。Asp-LDH、Glu-LDH 和 Phe-LDH 的 (003) 衍射峰均向小角度偏移, 对应层间距分别为 11.95、12.33 和 17.65 Å, 表明氨基酸已进入 LDH 层间。FT-IR 结果如图 2(f) 所示, NO_3^- -LDH 位于 3448 cm^{-1} 处的峰归属于 LDH 层板中羟基及层间水分子的 O—H 伸缩振动^[18]; 1384 cm^{-1} 处的峰则对应于 NO_3^- 的特征振动^[19]。氨基酸插层 LDH 样品的谱图中出现新峰: 1561 cm^{-1} 和 1405 cm^{-1} 处的吸收峰分别归属于羧酸根离子 ($-COO^-$) 的不对称和对称伸缩振动^[12, 20]; Phe-LDH 在 1496 cm^{-1} 处的吸收峰归属于苯丙氨酸中 C=C 的伸缩振动^[21]。上述分析表明氨基酸已成功插入 LDH 层间。

3.2 氨基酸插层 LDH 吸附 HA 的性能

由图 3 可知, NO_3^- -LDH、Asp-LDH、Glu-LDH 和 Phe-LDH 对 HA 的平衡吸附容量分别为 58.8、125.4、166.9 和 196.8 mg/g。结果表明, 氨基酸插层 LDH 的吸附容量与氨基酸等电点成正比, 氨基酸等电点越高 (Asp 2.77 < Glu 3.22 < Phe 5.48), 其对应的插层材料吸附量也越大 (125.4 mg/g < 166.9 mg/g < 196.8 mg/g), 其中 Phe-LDH 的吸附性能最佳。因此, 后续研究选用 Phe-LDH 作为功能填料制备复合气凝胶。

3.3 XG/PL 复合气凝胶的形貌特征与表征分析

Phe-LDH 纳米片在实际应用中存在难以从溶液中有效分离的问题, 易造成二次污染并限制其重复使用。XG 生物质气凝胶具有高孔隙率、良好可回收性等特点, 是负载 Phe-LDH 纳米片的优良支撑材料。本文以环氧氯丙烷为交

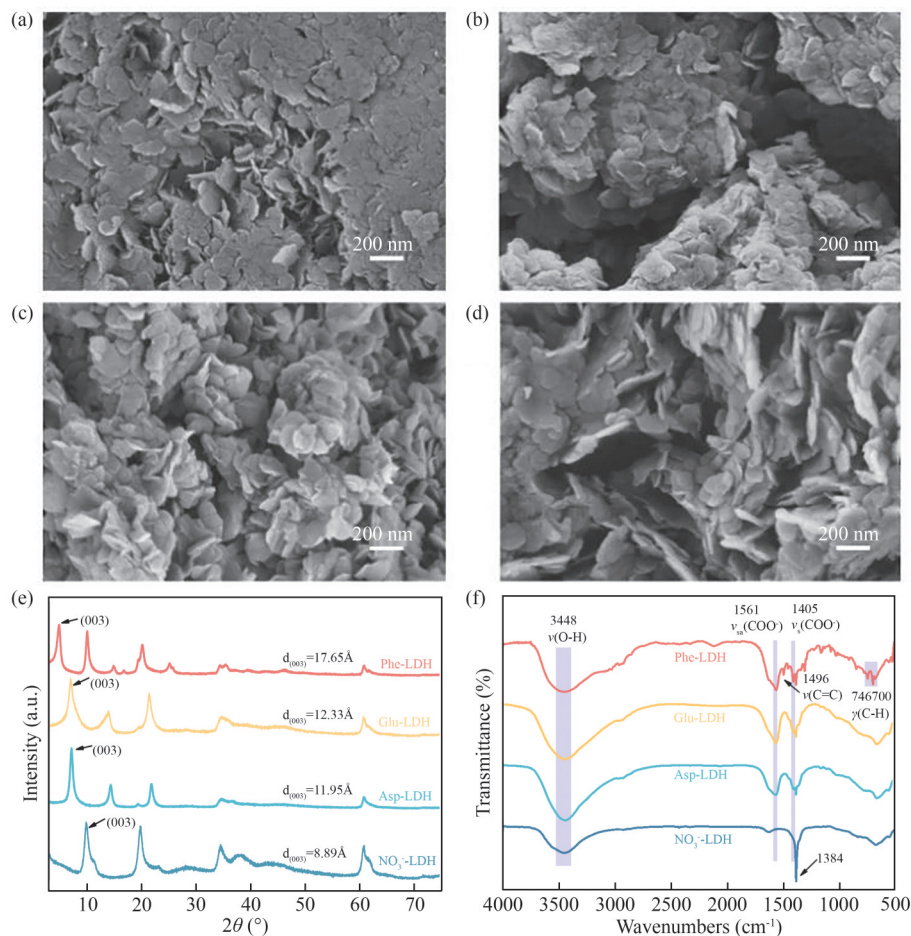


图2 NO_3^- -LDH (a)、Asp-LDH (b)、Glu-LDH (c) 和 Phe-LDH (d) 的 SEM 图像; NO_3^- -LDH、Asp-LDH、Glu-LDH 和 Phe-LDH 的 XRD 谱图 (e) 和 FT-IR 谱图 (f)。

Figure 2 SEM images of NO_3^- -LDH (a), Asp-LDH (b), Glu-LDH (c), and Phe-LDH (d); XRD patterns (e) and FT-IR spectra (f) of NO_3^- -LDH, Asp-LDH, Glu-LDH, and Phe-LDH.

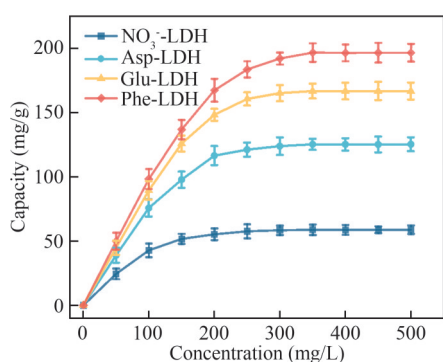


图3 不同氨基酸插层 LDH 对 HA 平衡吸附容量的比较。

Figure 3 Comparison of equilibrium adsorption capacity of HA on different amino acid-intercalated LDHs.

联剂, 通过改变 Phe-LDH 添加量制备一系列不同负载量的 XG/Phe-LDH (XG/PL) 复合气凝胶。实验中发现, 当 LDH 与 XG 质量比为 5:1 时, 体系流动性变差, 纳米片分散不均匀, 冷冻干

燥后难以形成稳定三维网络结构。因此, 确定 LDH 与 XG 质量比为 4:1 的样品 (XG/PL4) 为最佳负载配比。采用 SEM 对 XG/PL 复合气凝胶的微观形貌进行表征, 结果如图 4 所示。复合气凝胶内部呈三维多孔网络结构, 孔隙分布比较均匀, 并具有定向排列特征。其丰富的孔道结构有利于暴露更多的活性位点, 也为 HA 分子的扩散和传质提供通道。

为证实 XG/PL 复合气凝胶制备成功, 采用 XRD 与 FT-IR 对其结构进行表征。图 5(a) 为一系列 XG/PL 复合材料的 XRD 谱图。XG/PL0 无明显衍射峰, 表明其为无定形结构; 随着 Phe-LDH 的引入, 复合气凝胶中出现多个尖锐衍射峰, 且与 Phe-LDH 特征峰吻合, 证实纳米片在复合及冷冻干燥过程中晶体结构保持完整, 并成功负载于 XG 三维网络中。图 5(b) 进一步提供

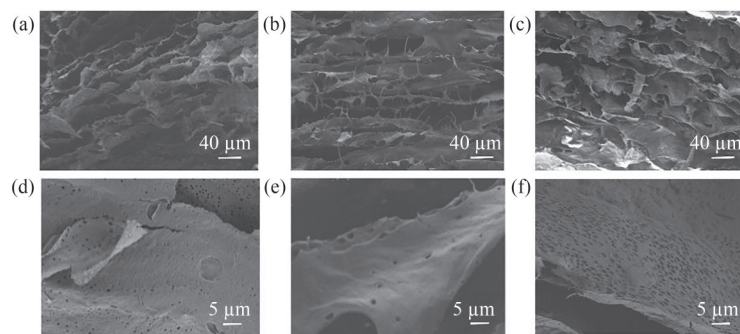


图4 XG/PL0 (a, d)、XG/PL2 (b, e) 和XG/PL4 (c, f) 的SEM图像。

Figure 4 SEM images of XG/PL0 (a, d), XG/PL2 (b, e), and XG/PL4 (c, f).

了分子结构信息。与XG/PL0相比, Phe-LDH掺杂后的复合气凝胶在 $500\sim 800\text{ cm}^{-1}$ 处出现了归属

于Mg—O和Al—O键的振动峰^[12], 证实Phe-LDH已成功引入。

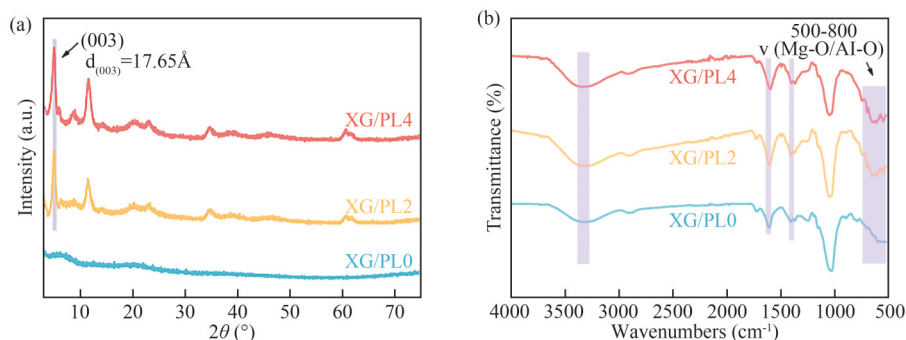


图5 XG/PL气凝胶的XRD谱图(a)和FT-IR谱图(b)。

Figure 5 XRD pattern (a) and FT-IR spectrum (b) of XG/PL aerogel.

3.4 吸附等温实验

为研究初始浓度对吸附性能的影响, 测定了HA在XG/PL复合材料上的吸附等温线。如图6(a)所示, XG/PL0对HA吸附能力极低; 随

Phe-LDH负载量增加, XG/PL的吸附量提高。其中XG/PL4的吸附容量随HA初始浓度增大而增大, 当HA初始浓度约为 300 mg/L 时趋于平衡, 实测最大吸附容量为 139.6 mg/g 。

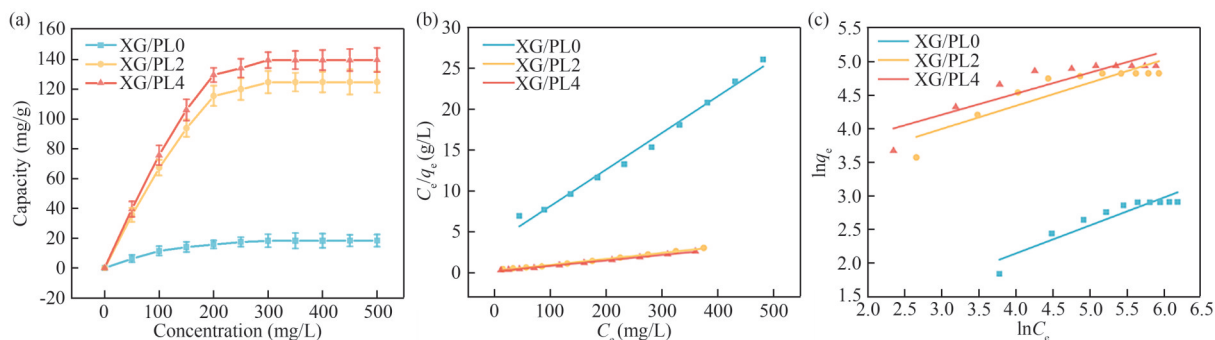


图6 (a) 初始浓度对XG/PL吸附HA的影响; (b) Langmuir方程拟合曲线; (c) Freundlich方程拟合曲线。

Figure 6 (a) Effect of initial concentration on HA adsorption by XG/PL; (b) Langmuir isotherm fitting curve; (c) Freundlich isotherm fitting curve.

采用Langmuir和Freundlich模型对实验数据进行拟合, 结果如图6(b)、图6(c)及表1

所示。Langmuir模型的相关系数(R^2)高于Freundlich模型, 表明Langmuir模型能更好地

描述 HA 在吸附剂上的吸附行为，吸附过程以单层均相吸附为主^[22]。由 Langmuir 模型

拟合得到 XG/PL4 的最大理论平衡吸附量为 149 mg/g。

表1 XG/PL 吸附 HA 的 Langmuir 和 Freundlich 模型拟合参数。

Table 1 Fitting parameters of Langmuir and Freundlich models for HA adsorption by XG/PL.

吸附剂	Langmuir 模型			Freundlich 模型		
	$q_{\max}$ (mg/g)	K_L (L/mg)	R^2	K_F (mg/g)	n	R^2
XG/PL0	22.3	0.0121	0.9889	1.6	2.3905	0.8767
XG/PL2	136.4	0.0387	0.9955	19.4	2.8991	0.8156
XG/PL4	149.0	0.0549	0.9975	26.3	3.1831	0.8030

3.5 吸附动力学实验

为探究吸附行为随时间的变化规律，进行了吸附动力学实验，所得吸附动力学曲线如图 7(a) 所示。在初始阶段 (0~60 min)，所有材料均对 HA 表现出快速吸附，约在 180 min 内达到平衡吸附容量的 90%。该快速吸附归因于材料表面存在大量可利用的结合位点。随活性位点逐渐饱和及传质阻力增大，吸附速率明显下降，进入缓慢阶段 (180~240 min)；此后各吸附剂的

吸附容量趋于稳定，表明吸附达到平衡。

为进一步阐明吸附机理，采用准一级动力学模型和准二级动力学模型对实验数据进行拟合，并根据相关系数 (R^2) 评价模型适用性^[22]。各样品的动力学拟合曲线及相应参数分别如图 7(b)、图 7(c) 和表 2 所示。结果表明，准二级动力学模型的 R^2 值均显著高于准一级动力学模型，说明吸附剂对 HA 的吸附行为更符合准二级动力学模型，表明该吸附过程本质上是经典的化学吸附。

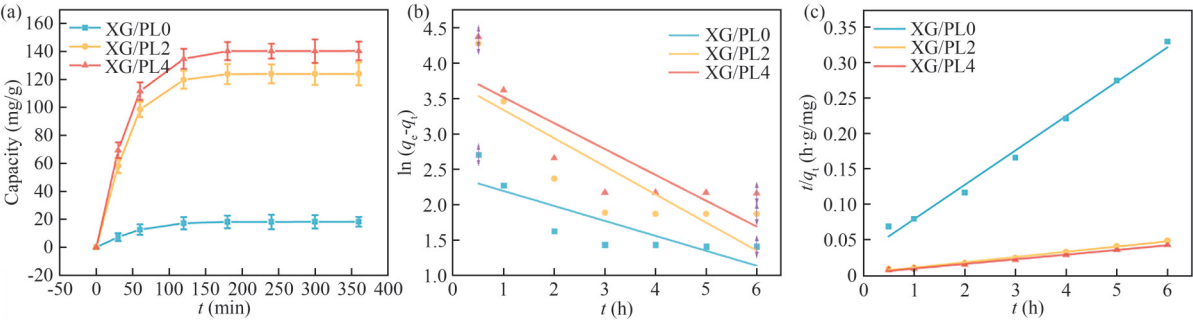


图7 (a) XG/PL 吸附 HA 的动力学曲线; (b) 准一级动力学模型拟合曲线; (c) 准二级动力学模型拟合曲线。
Figure 7 (a) Kinetic curve of XG/PL adsorption of HA; (b) Pseudo-first-order kinetic model fitting curve; (c) Pseudo-second-order kinetic model fitting curve.

表2 XG/PL 吸附 HA 的动力学拟合参数。

Table 2 Kinetic fitting parameters for HA adsorption by XG/PL.

吸附剂	准一级动力学模型			准二级动力学模型		
	q_e (mg·g ⁻¹)	k_1 (h ⁻¹)	R^2	q_e (mg·g ⁻¹)	k_2 (g·mg ⁻¹ ·h ⁻¹)	R^2
XG/PL0	11.1	0.2115	0.6906	20.6	0.0778	0.9916
XG/PL2	42.0	0.3976	0.7027	134.9	0.0179	0.9949
XG/PL4	48.8	0.3656	0.7086	151.6	0.0170	0.9962

3.6 吸附再生实验

吸附剂的可重复使用性是评价其实际应用潜力的重要指标。为评估 XG/PL4 复合气凝胶的循环使用稳定性，在 25 °C 下进行连续吸附-解吸循环实验，结果如图 8 所示。第 2 次循环

时，XG/PL4 对 HA 的去除率由初始的 99.6% 骤降至 72.3%；随着循环次数增加，去除率呈持续下降趋势，经 6 次循环后进一步降至 55.7%。结果表明，XG/PL4 的重复使用性能仍有待提高。

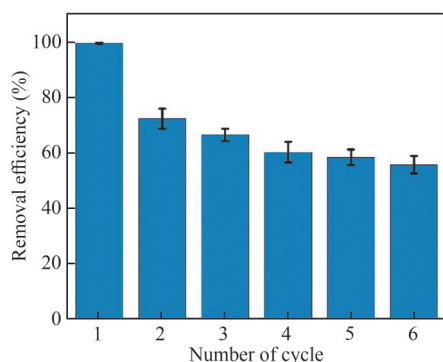


图8 XG/PL4对HA的吸附循环性能。

Figure 8 Adsorption cycle performance of XG/PL4 for HA.

3.7 吸附机理分析

阐明吸附机理对推动蛋白质结合毒素吸

附剂的开发与实际应用具有重要意义。FT-IR 分析结果如图 9(a) 所示, 吸附 HA 后 XG/PL4 的主要特征峰得以保留; 此外, XG/PL4-HA 在 1676 cm^{-1} 和 1285 cm^{-1} 处出现新吸收峰, 分别归属于酰胺 I 带和酰胺 III 带, 证实了 HA 分子已成功吸附于 XG/PL4 表面^[23]。为深入探究吸附机理, 采用 XRD 对吸附 HA 前后的样品进行表征, 结果如图 9(b) 所示。对比吸附前后的 XRD 谱图可知, 吸附 HA 后, XG-PL4 的 (003) 晶面衍射峰向高角度偏移, 经计算其晶面间距由 17.65 Å 减小至 12.07 Å 。这一结果证实, Phe-LDH 吸附 HA 后层间物质发生改变, HA 分子已进入层间。

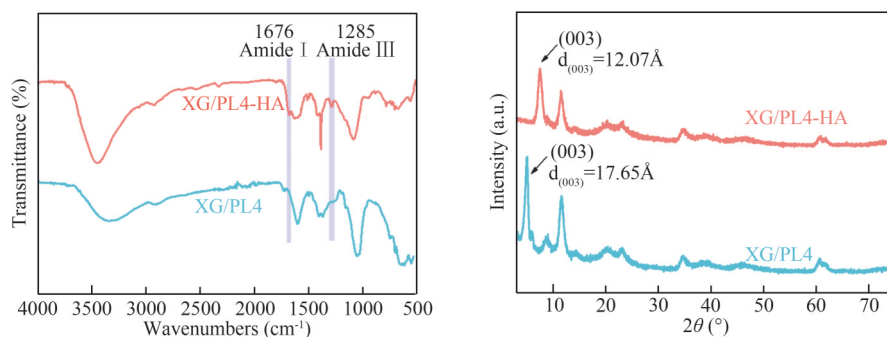


图9 Phe-LDH 吸附 HA 前后的 FT-IR 谱图 (a) 和 XRD 谱图 (b)。

Figure 9 FT-IR spectra (a) and XRD patterns (b) of Phe-LDH before and after HA adsorption.

为进一步验证 Phe-LDH 对 HA 的吸附机理, 设计了氨基酸显色实验。该实验基于水合茚三酮与 α -氨基酸的特征显色反应: 如图 10(a) 所示, 加热条件下, 水合茚三酮与 α -氨基酸经氧化脱氨、脱羧和缩合等多步反应生成蓝紫色化合物——鲁赫曼紫^[24-25]。如图 10(b) 所示,

HA 与水合茚三酮不会发生显色反应。将 Phe-LDH 分散于纯水中, 离心分离后取上清液进行显色反应, 结果未观察到蓝紫色出现。随后, 将 Asp-LDH、Glu-LDH 和 Phe-LDH 分别与 HA 溶液接触吸附后, 收集上清液并进行显色反应。3 种氨基酸插层 LDH 对应的滤液均与水

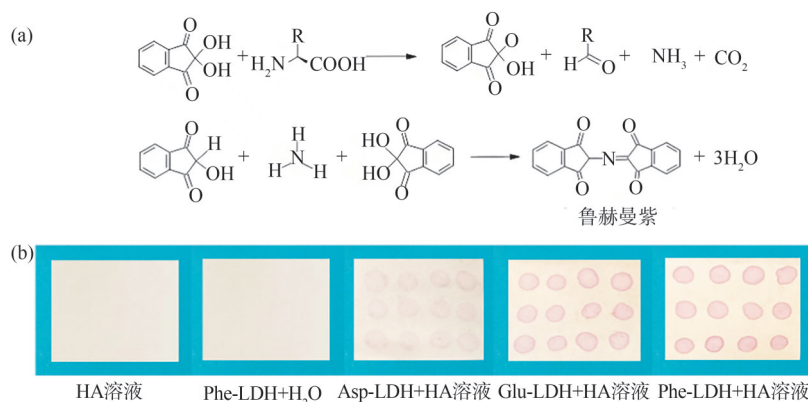


图10 (a) 水合茚三酮与氨基酸显色反应原理; (b) 氨基酸显色实验。

Figure 10 (a) Principle of the color reaction of ninhydrin with amino acids; (b) Amino acid color development experiment.

合茝三酮发生了明显的显色反应,呈现出特征的蓝紫色。由上述实验结果可知:HA本身不干扰显色反应;氨基酸插层LDH在水溶液中稳定,不会自发释放氨基酸;而3种氨基酸插层LDH与HA接触后,滤液中均检测到游离氨基酸。这一系列对照实验充分证明,在吸附过程中,层间的氨基酸被HA置换出来并进入溶液相。因此,可以得出结论:氨基酸插层LDH对HA的吸附机理主要为层间离子置换机制。

4 结 论

本研究通过共沉淀法成功制备了不同氨基酸插层LDH,评价其对HA的吸附性能,并选取性能最优的Phe-LDH作为功能填料与XG复合制备XG/PL复合气凝胶,考察其对HA的吸附性能,主要结论如下:

(1) 氨基酸插层改性显著提升了LDH对HA的吸附能力。3种氨基酸插层LDH对HA的吸附容量均明显优于 NO_3^- -LDH,证实插层改性的有

效性。分析发现,氨基酸插层LDH的吸附容量与插层氨基酸的等电点呈正相关:随着等电点增大($\text{Asp } 2.77 < \text{Glu } 3.22 < \text{Phe } 5.48$),其对应材料的吸附容量依次升高($125.4 \text{ mg/g} < 166.9 \text{ mg/g} < 196.8 \text{ mg/g}$)。其中,Phe-LDH表现出最优的吸附性能,吸附容量达到 196.8 mg/g 。

(2) 为解决Phe-LDH纳米片难分离回收的问题,采用冷冻干燥法将其负载于生物质材料XG中,制备XG/PL复合气凝胶。优化后XG/PL4复合气凝胶对HA展现出优异的吸附性能,最大吸附容量达 149 mg/g ;经6次吸附-解析循环后去除率降至55.7%,表明XG/PL4的重复使用性能仍有待提升。

(3) 吸附机理研究表明,XG/PL对HA的高效吸附主要归因于Phe-LDH的层间阴离子置换机制。在实验条件下带负电荷的HA分子可进入LDH层间,置换出稳定性较弱的氨基酸客体离子。氨基酸的等电点越高,其与LDH层板的静电作用越弱,越容易被HA置换,从而获得更高的吸附容量。

参考文献

- 1 Vanholder R, Annemans L, Bello A K, et al. Fighting the unbearable lightness of neglecting kidney health: The decade of the kidney [J]. *Clinical Kidney Journal*, **2021**, 14(7): 1719-1730.
- 2 Vanholder R, Massy Z, Argiles A, et al. Chronic kidney disease as cause of cardiovascular morbidity and mortality [J]. *Nephrology Dialysis Transplantation*, **2005**, 20(6): 1048-1056.
- 3 Sanchez-ospina D, Mas-fontao S, Gracia-iguacel C, et al. Displacing the burden: A review of protein-bound uremic toxin clearance strategies in chronic kidney disease [J]. *Journal of Clinical Medicine*, **2024**, 13(5): 1428.
- 4 Sternkopf M, Thoroe-boveleth S, Beck T, et al. A bifunctional adsorber particle for the removal of hydrophobic uremic toxins from whole blood of renal failure patients [J]. *Toxins*, **2019**, 11(7), 389.
- 5 Jansen J, Jankowski J, Gajjala A P R, et al. Disposition and clinical implications of protein-bound uremic toxins [J]. *Clinical Science*, **2017**, 131(14): 1631-1647.
- 6 Daneshamouz S, Eduok U, Abdelrasoul A, et al. Protein-bound uremic toxins (PBUTs) in chronic kidney disease (CKD) patients: Production pathway, challenges and recent advances in renal PBUTs clearance [J]. *NanoImpact*, **2021**, 21: 100299.
- 7 Ghannoum M, Bouchard J, Nolin T D, et al. Hemoperfusion for the treatment of poisoning: Technology, determinants of poison clearance, and application in clinical practice [J]. *Seminars in Dialysis*, **2014**, 27(4): 350-361.
- 8 Kim W, Hong S, Kim K, et al. Scalable ion concentration polarization dialyzer for peritoneal dialysate regeneration [J]. *Journal of Nanobiotechnology*, **2025**, 23(1): 225.
- 9 Zhao Q, Seredych M, Precetti E, et al. Adsorption of uremic toxins using $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene for dialysate regeneration [J]. *ACS Nano*, **2020**, 14(9): 11787-11798.
- 10 Shi Y Y, Tian H J, Wang Y F, et al. Improved dialysis removal of protein-bound uraemic toxins with a combined displacement and adsorption technique [J]. *Blood Purification*, **2022**, 51(6): 548-558.
- 11 Li J Y, Han L L, Xie J, et al. Multi-sites polycyclodextrin adsorbents for removal of protein-bound uremic toxins combining with hemodialysis [J]. *Carbohydrate Polymers*, **2020**, 247: 116665.

- 12 Ding S P, Wang D, Wang X F. Hierarchically structural layered double oxides with stretchable nanopores for highly effective removal of protein-bound uremic toxins [J]. *Separation and Purification Technology*, **2022**, 301: 122033.
- 13 Jin Y Y, Ding S P, Li P Y, et al. Coordination of thin-film nanofibrous composite dialysis membrane and reduced graphene oxide aerogel adsorbents for elimination of indoxyl sulfate [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **2022**, 49: 111-121.
- 14 丁斯平. 血液透析用多孔纳米吸附材料的制备及其性能研究 [D]. 上海: 东华大学, **2024**.
- 15 岳献阳, 李霞, 喻红芹, 等. 碳酸根插层 LDHs 改性黄麻织物及其阻燃性 [J]. *上海纺织科技*, **2015**, 51(12): 68-73.
- 16 Vasileva V I, Akberova E M, Saud A M, et al. Current-voltage characteristics of membranes with different cation-exchanger content in mineral salt-neutral amino acid solutions under electrodialysis [J]. *Membranes*, **2022**, 12(11): 1092.
- 17 李隽群. 氨基酸、肽、蛋白质在溶液中带电状况分析 [J]. *黔西南民族师范高等专科学校学报*, **2003**(1): 72-77.
- 18 Yu Y, Chen J P. Key factors for optimum performance in phosphate removal from contaminated water by a Fe-Mg-La tri-metal composite sorbent [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, **2015**, 445: 303-311.
- 19 Shamsayei M, Yamini Y, Asiabi H. Fabrication of zwitterionic histidine/layered double hydroxide hybrid nanosheets for highly efficient and fast removal of anionic dyes [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, **2018**, 529: 255-264.
- 20 Hay M B, Myneni S C B. Structural environments of carboxyl groups in natural organic molecules from terrestrial systems. Part 1: infrared spectroscopy [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **2007**, 71(14): 3518-3532.
- 21 Zhang Y M, Mushtaq N, Fang X, et al. In situ FTIR analysis for the determination of imidization degree of polyimide precursors [J]. *Polymer*, **2022**, 238: 124416.
- 22 廖艳, 邱小伟, 何春林, 等. 镧钕改性活性氧化铝及其对氟的吸附性能研究 [J]. *离子交换与吸附*, **2025**, 41(4): 279-291.
- 23 Ji Y, Yang X L, Ji Z, et al. DFT-calculated IR spectrum amide I, II, and III band contributions of N-methylacetamide fine components [J]. *ACS Omega*, **2020**, 5(15): 8572-8578.
- 24 Vavaiya P P, Malviya N J, Alshehri A A, et al. The reaction of ninhydrin revisited: Applications in quantification of analytes, active pharmaceutical ingredients and amino acids [J]. *Journal of Molecular Structure*, **2026**, 1350:144034.
- 25 袁传军. 基于氨基酸显色反应的手印显现技术 [J]. *化学教育*, **2020**, 41(21): 113.

Preparation of Xanthan Gum/Phenylalanine-Intercalated LDH Composite Aerogel and Its Adsorption Performance for Hippuric Acid

AN Bo-fan, WANG Xue-fen*

(State Key Laboratory of Advanced Fiber Materials, College of Materials Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract To efficiently remove accumulated toxins in dialysate, layered double hydroxides (LDHs) intercalated with aspartic acid (Asp), glutamic acid (Glu), and phenylalanine (Phe) were prepared by coprecipitation method, and their adsorption performance for hippuric acid (HA) was investigated. The results showed that Phe-LDH exhibited the optimal performance with an adsorption capacity of 196.8 mg/g. Based on this, XG/Phe-LDH composite aerogel (XG/PL) was fabricated by freeze-drying method. The optimized composite aerogel exhibited a maximum adsorption capacity of 149 mg/g for HA, and the adsorption behavior followed the Langmuir isotherm model and pseudo-second-order kinetic model, indicating monolayer homogeneous chemisorption. Analysis confirmed that the interlayer ion exchange mechanism of Phe-LDH contributed to the efficient adsorption capacity of XG/PL.

Keywords Layered double hydroxide, Amino acid, Aerogel, Adsorption

* Corresponding author: WANG Xue-fen, E-mail:wangxf@dhu.edu.cn.