

Статья

Сшитый паром гидроксипропил-β-циклодекстрин Электропряденные нановолокнистые мембраны для сверхбыстрого удаления красителей

Синьямо Суй, И Чжан, Юн Чен * и Юй Лю *

Химический колледж, Государственная ключевая лаборатория элементоорганической химии, Нанкайский университет, Тяньцзинь
300071, Китай * Адрес для переписки: chenying@nankai.edu.cn (YC); yuliu@nankai.edu.cn (YL)

Аннотация: Традиционные разделительные мембраны, используемые для удаления красителей, часто страдают от компромисса между эффективностью разделения и водопроницаемостью. В настоящей работе мы предлагаем простой подход к получению высокопоточных нановолокнистых мембран на основе циклодекстрина с помощью процессов электропрядения и сшивки в паре. Применение паров глutarового альдегида для сшивания электропряденных мембран гидроксипропил-β-циклодекстрина (ГП-β-ЦД)/поливинилового спирта (ПВС)/лапонита может создавать взаимосвязанные структуры и приводить к образованию пористого иерархического слоя. Кроме того, включение неорганической соли, лапонита, может изменить процесс сшивки, в результате чего получаются мембраны с улучшенной гидрофильностью и хорошо сохраняемой электроформованной нановолокнистой морфологией, что способствует сверхбыстрому потоку воды 1,0 × 10⁵ лч-1 м-2 бар-1. Благодаря синергетическому эффекту сильного взаимодействия «хозяин-гость» и электростатического взаимодействия мембраны демонстрируют подходящую устойчивость к анионным красителям с высокой эффективностью удаления > 99% за короткое время и обеспечивают точное разделение катионных и анионных красителей, сопровождаемое подходящей пригодностью для вторичной переработки. с эффективностью разделения > 97% после как минимум четырех сепараций-регенераций. Полученные мембраны с замечательной эффективностью разделения и сверхбыстрой проницаемостью могут стать многообещающим кандидатом на роль высокоэффективных мембран для очистки воды.

Ключевые слова: циклодекстрин; супрамолекулярная адсорбция; электроспиннинг; нановолокнистые мембраны; сверхбыстрое проникновение



Цитирование: Суй, Х.; Чжан, Ю.; Чен, Ю.; Лю, Ю. Сшитые электропрядением гидроксипропил-β-циклодекстрина нановолокнистые мембраны, получаемые паром, для сверхбыстрого удаления красителей. Химия 2024, 6, 506–516. <https://doi.org/10.3390/chemistry6040029>

Поступила: 22 мая 2024 г.

Пересмотрено: 19 июня 2024 г.

Принято: 21 июня 2024 г.

Опубликовано: 25 июня 2024 г.



Копирайт: © 2024 авторов.

Лицензиат MDPI, Базель, Швейцария.

Эта статья находится в открытом доступе. распространяется на условиях и условия Creative Commons

Лицензия с указанием авторства (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Введение

Многие синтетические органические красители, используемые в пищевой, косметической, кожевенной и текстильной промышленности, обладают мутагенными и канцерогенными свойствами [1,2]. Водные экосистемы и здоровье человека находятся под серьезной угрозой из-за широкомасштабного выброса сточных вод красителей в условиях быстрого роста индустриализации [3]. Очень важно найти эффективные методы удаления красителей при очистке сточных вод. Многочисленные тактики, такие как химическое окисление [4], биологическое разложение [5] и адсорбция [6,7], были тщательно изучены. Среди них технология мембранного разделения вызывает все больший интерес из-за ее доступности, удобства и отсутствия загрязнения [8]. В результате прилагаются большие усилия для создания высокопроизводительных мембран, которые одновременно обладают

сильным отторжением и высоким потоком [9,10]. β-циклодекстрин (β-ЦД), который является дешевым и устойчивым, обладает гидрофобной полостью, позволяющей образовывать стабильные комплексы включения с определенными органическими молекулами посредством взаимодействий хозяин-гость, и широко применяется при адсорбции загрязнителей [11–14]. Кроме того, используя основной строительный блок мембран, собственную микропористость β-ЦД, можно добиться точного разделения за счет исключения размера и служить дополнительным каналом транспортировки воды [15,16]. Пейнеманн и др. разработал метод с использованием пер-6-амино-β-ЦД вместо диамина, реагирующего с терефталойлхлоридом, с образованием разделительного слоя на основе циклодекстрина путем межфазной полимеризации, который показал точную проницаемость, избирательную по форме, и водопроницаемость 20 лм-2 ч-1 бар. 1 [17]. Однако эти сшитые мембраны на основе ЦД, полученные традиционными реакциями межфазной полимеризации в растворе, все еще слишком плотны, чтобы обеспечить быстрый транспорт

(a) Electrodeposition setup. A power source (V) is connected to a PAN/PEI-coated electrode. The electrode is immersed in a solution containing HP-β-CD, PVA, GA, Laponite, dye, and water. (b) Deposition of the HP-β-CD/PAN/PEI/GA composite film. (c) Deposition of the Laponite composite film.

Legend: HP-β-CD (blue cylinder), PVA (wavy line), GA (green line), Laponite (grey oval), Dye (yellow circle), Water (blue circle).

Рисунок 1. (а) Схематическое изображение приготовления нановолоконных мембран HP-β-CD. Схематическое изображение иллюстрация процесса шивки и фильтрации сточных вод CD-CNF (б) без лапонита и (в) с лапонитом.

2. Материалы и методы

2.1. Материалы

Все реагенты использовали без дополнительной очистки. Полиакрилонитрил (ПАН, средняя Mw = 150 000), полиэтиленимин (ПЭИ, средняя Mw = 45 000, 50% водный раствор), поливиниловый спирт (ПВС, 99% гидролизированный, степень полимеризации = 1700), гидроксипропил β -циклодекстрин (HP- β -CD, средняя степень замещения = 7, Mw = 1541,54), лапонит, глутаральдегид (ГА, 25%-ный водный раствор) и бычий сывороточный белок (БСА) были приобретены у компании Macklin Reagent Co., Ltd. (Тяньцзинь, Китай). Тропаеолин О, индигокармин, кармоизин, прямой желтый 12, реактивный черный 5, основной красный 2, родамин В, кристаллический фиолетовый и тиюфлавин Т были приобретены у компании Aladdin Reagent Company.

2.2. Подготовка нановолокнистых мембран

Электропрядение: 9,6% мас./об. ПАН и 2,4% мас./об. ПЭИ растворяли в N,N-диметилформамиде (ДМФ) и перемешивали в течение 6 часов при 80 °С для получения гомогенного раствора. Всего в шприц с манометром 20 было загружено 8 мл раствора с расходом 4 мл/ч.

, и подавалось высокое напряжение (15 кВ). Расстояние между шприцем и коллектором, покрытым алюминиевой (Al) фольгой, составляло 20 см, а скорость вращения цилиндрического коллектора составляла 125 об/мин. Всего 1 г HP- β -ЦД, 80 мг ПВС и различные массы лапонита: 0 мг, 10 мг, 20 мг и 30 мг, что соответствует массовому соотношению к HP- β -ЦД, равному 0, 1%, 2% и 3% растворяли в 2 мл деионизированной воды и перемешивали в течение ночи соответственно. Вышеупомянутые растворы переносили в шприц калибра 23 и электроформовали непосредственно на алюминиевую фольгу, покрытую ПАН/ПЭИ. Напряжение было установлено равным 25 кВ, а скорость потока составляла 1 мл/ч. В зависимости от доли лапонита в HP- β -CD четыре типа мембран обозначались как CD/PVA/Lap0, CD/PVA/Lap1%, CD/PVA/Lap2% и CD/PVA/Lap3%.

В общей сложности 20 мл раствора ГК (25% водный раствор) в чашке Петри помещали в вакуумный эксикатор и полученные электропряденные нановолокна на алюминиевой фольге накрывали за пределами чашки Петри, не касаясь раствора. После применения вакуума в течение 24 ч мембраны снимали с фольги, промывали деионизированной водой в течение нескольких минут и сушили в вакууме при 50 °С в течение ночи. Сшитые мембраны были представлены как CD-CNF1 (CD/PVA/Lap0), CD-CNF2 (CD/PVA/Lap1%), CD-CNF3 (CD/PVA/Lap2%) и CD-CNF4 (CD/PVA/Lap3%). Круг3%.

2.3. Методы характеристики

Сканирующий электронный микроскоп с полевой эмиссией (Merlin Compact, Оберкохен, Германия) использовали для получения морфологии поверхности нановолокнистых мембран. Для увеличения проводимости на покрытие был нанесен тонкий слой золота. Ускоряющее напряжение составляло 30 кВ. Средние диаметры волокон измеряли с помощью программного обеспечения Image J 1,46 г. ИК-спектрометр с преобразованием Фурье (Bruker Tensor II, Эттлинген, Германия) использовали для получения ИК-спектров образцов между 4000 и 400 см⁻¹ при температуре окружающей среды. Рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию (РФЭС) проводили на приборе (Kratos Analytical Ltd.-Axis Ultra DLD, Манчестер, Великобритания), оснащенном монохроматизированным источником рентгеновского излучения Al K α . Данные анализировали с помощью программного обеспечения CASA XPS (номер версии Casa2319PR1-0). Термогравиметрический анализ (ТГА) проводили на термогравиметрическом анализаторе (NET-ZSCH, Selb, Германия) в диапазоне температур от 25 до 800 °С при скорости нагрева 10 °С/мин с использованием N₂ в качестве продувочного газа при скорости потока Угол . Контакт с водой 25 мл/мин (WCA) определяли с помощью гониометра, состоящего из анализатора (Dataphysical OCA20, Фильдерштадт, Германия). Поверхностный заряд мембран оценивали с помощью анализа зета-потенциала с использованием электрокинетического анализатора SurPASS 3.

2.4. Исследования водопроницаемости

Для оценки общей пористости полученных мембран использовали водосорбционно-гравиметрический метод. Мембраны разрезали на кусочки размером 10 × 10 мм. Отбирали высушенную массу (Wd), а затем мембраны замачивали в деионизированной воде на 24 часа. После

слегка промокая поверхность мембран фильтровальной бумагой для удаления воды, определяли массу влажных мембран (W_w). Процент содержания воды в мембранах рассчитывали по формуле

$$\text{Содержание воды \%} = \times \frac{W_w - W_d}{W_t} \times 100 \quad (1)$$

После вымачивания в деионизированной воде в течение 24 часов мембраны разрезали на квадраты размером 20×20 мм. Мембраны предварительно подвергали давлению 1 бар в течение 10 минут для стабилизации скорости потока. Для анализа производительности применялись чистая вода и органический растворитель, включая этиловый спирт, петролейный эфир и дихлорметан. Скорость потока пермеата (J) для всех приготовленных мембран рассчитывали по уравнению (2).

$$J = \frac{Q}{t \cdot A} \quad (2)$$

где Q обозначает объем проникшего растворенного вещества (в л), t — время, затраченное на проникновение (в часах), а A — эффективную площадь фильтрации мембран (в m^2).

2.5. Эксперименты по фильтрации красителей

Была проведена серия фильтрационных экспериментов с тупиковой песчаной сердцевинной устройства для фильтрации микрорастворителей с использованием вакуумного насоса. Пять видов анионных красителей включали индигокармин, тропеолин О, реактивный черный 5, прямой желтый 12 и кармоизин, а четыре вида катионных красителей включали основной красный 2, кристаллический фиолетовый, родамин В и тиофлавин Т. Эффективная площадь мембран составила $1,77 \text{ cm}^2$.

Концентрацию красителя фиксировали на уровне 25 мкМ , объем питающего раствора составлял 5 мл . Пригодность мембран к вторичной переработке также оценивали с использованием пяти вышеуказанных видов анионных красителей (10 мкМ), при этом исходный раствор каждый раз составлял 20 мл . После фильтрации мембраны замачивали в 1 моль/л растворе NaOH , колебали в течение 5 мин и несколько раз промывали. Циклы фильтрации/регенерации повторяли четыре раза.

Эксперименты по предотвращению обрастания проводились с использованием водного раствора BSA (500 частей на миллион) в качестве модельного загрязняющего вещества при давлении 1 бар . Каждый раз для достижения потока пермеата добавляли в общей сложности 40 мл питающего раствора BSA с концентрацией 500 ppm и мембраны промывали деионизированной водой в течение одной минуты. Процессы повторялись четыре раза. Начальный поток воды был выбран J_w , а поток после одного цикла — $J_{w,1}$. Поток воды после промывки чистой водой обозначили $J_{w,1}$. Работоспособность всех мембран исследовали в течение 1 ч . Используя уравнения (3) и (4), полученные значения потока использовались для оценки общего процента загрязнения (FT)% и процента коэффициента восстановления (FRR)%.

$$\text{FT}(\%) = \frac{J_w - J_0}{J_w} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{FRR}(\%) = \frac{J_{w,1} - J_0}{J_w - J_0} \times 100 \quad (4)$$

3. Результаты

3.1. Структурные и морфологические характеристики CD-CNF. FTIR-спектры

мембран CD/PVA/Lap0, CD-CNF1, CD-CNF2, CD-CNF3 и CD-CNF4 представлены на рисунке 2а. Адсорбция Mg-OH на валентных колебаниях из лапонита проявлялась при 655 см^{-1} в мембранах CD-CNF2, CD-CNF3 и CD-CNF4. Кроме того, в CD-CNF2, CD-CNF3 и CD-CNF4 появился характерный пик $-\text{C}=\text{N}$ при 2240 см^{-1} в слое подложки, вызванный процессом электроформования с участием лапонита, который создавал поверхностные дефекты. За исключением CD/PVA/Lap0, у CD-УНВ, принадлежащих валентному колебанию CH в ацетальной связи, появился новый пик при 2820 см^{-1} , а валентная адсорбция OH при $3200\text{--}3600 \text{ см}^{-1}$ снизилась, что свидетельствует о том, что гидроксильные группы в ГП-β-ЦД и ПВС взаимодействовали с альдегидными группами ГК. Пики

(a) (b)

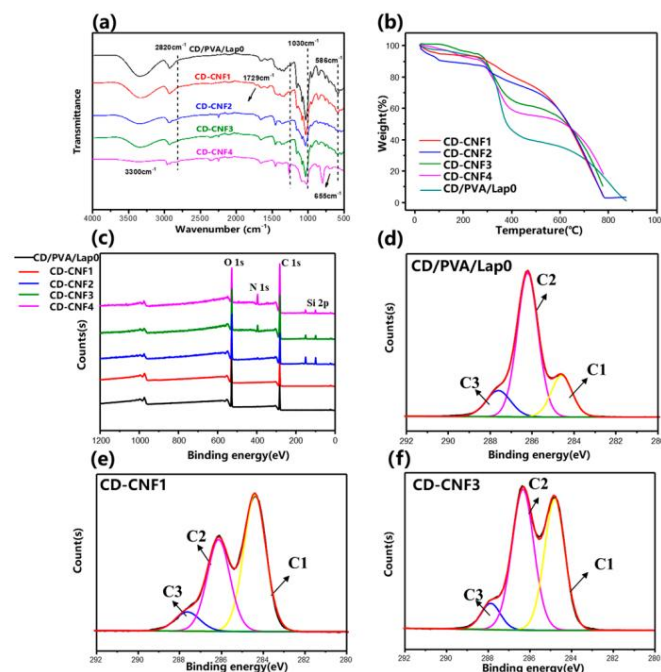


Рисунок 2. (а) FTIR-спектры и (б) кривые ТГА CD/PVA/Lar0 и CD-CNF; (с) Широкое сканирование XPS спектров для карбоновых функциональных групп на поверхности для CD/PVA/Lar0 (д) CD-CNF и (е) CD-CNF/Lar1 (Мембраны были подвержены воздействию пара при температуре кипения воды в течение 1 часа). С=O для C2 и ОСО для C3 [19].

Чтобы получить представление о процессе сшивки, была применена рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия. Чтобы получить представление о процессе сшивки, была применена рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия. Результаты широкого сканирования CD/PVA/aro (рис. 2с) показали, что была применена спектроскопия. Результаты широкого сканирования CD/PVA/aro (рис. 2с) показали, что во всех мембранах основные пики $C 1s$ и $O 1s$ появляются при 285 эВ и 532 эВ. Элемент обнаружен при 150 эВ и 99 эВ на мембранах с добавкой лапонита. Кроме того, в CD-CNF3 и CD-CNF4 пик энергии связи при 400 эВ отнесен к

ночь. Более того, в CD-CNF3 и CD-CNF4 появился пик энергии связи при 400 эВ, соответствующий элементу N из подложки, что подтверждает существование поверхностных дефектов. элемент N из подложки вышел, подтвердив наличие поверхностных дефектов в слое HP-β-CD. Деконволюцированные спектры основного уровня C 1s XPS CD/PVA/Lap0. в слое HP-β-CD. Спектры ядра ядра C 1s XPS CD/PVA/Lap0 и CD-CNF после деконволюции продемонстрировали (рис. 2d-f; рис. S3a,b), что после сшивания C1(CS, CD-CNF продемонстрировали (рис. 2d-f; рис. S3a,b), что после сшивания C1(CS, CH). Интенсивность пика CH увеличилась, а интенсивность пика C2(CO) снизилась в CD-CNF1. С пиковая интенсивность увеличилась, а пиковая интенсивность C2(CO) снизилась в CD-CNF1. С увеличением содержания лапонита соотношение C1/C2 имело тенденцию к уменьшению, что указывает на снижение С увеличением содержания лапонита соотношение C1/C2 имело тенденцию к уменьшению, что указывает на меньшую степень сшивки. степень сшивки. Процесс сшивания оказал прямое влияние на морфологию мембран.

Результаты сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) морфологии поверхности слоев HP-β-CD до и после обработки парами GA представлены на рисунке S4. С повышенным уровнем массовая доля лапонита в HP-β-CD, диаметр электроформованных нановолокон увеличился

Результаты сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) морфологии поверхности слоев НР-β-CD до и после обработки парами GA представлены на рисунке S4. При повышении массовой доли лапонита до НР-β-CD 51

Figure 1 consists of six SEM images labeled (a) through (f).
 (a) CD/PVA/Lap0: A top-down view of a dense, interwoven network of nanofibers. A 2 μm scale bar is in the bottom right.
 (b) CD/PVA/Lap2%: A top-down view of a dense network of nanofibers. Two red circles highlight specific 'Bead structure' on the fibers. A 2 μm scale bar is in the bottom right.
 (c) CD-CNF1: A top-down view of a network of nanofibers, some appearing thicker or more bundled. A 2 μm scale bar is in the bottom right.
 (d) CD-CNF3: A top-down view of a highly porous, interconnected network of nanofibers. A 2 μm scale bar is in the bottom right.
 (e) CD-CNF1 Side-view: A cross-sectional view of the CD-CNF1 membrane, showing the thickness and internal structure. A 10 μm scale bar is in the bottom right.
 (f) CD-CNF3 Side-view: A cross-sectional view of the CD-CNF3 membrane, showing the thickness and internal structure. A 10 μm scale bar is in the bottom right.

51,5 для CD-CNF4. Шероховатость поверхности вызвала гистерезис проницаемости, и

разделительные мембраны с присущей им гидрофобностью часто подвергаются загрязнению биомакромолекулами [34]. Однако гидрофильность поверхности мембран, о которых мы сообщали, была значительно увеличена. Изучено влияние объема раствора БСА на проникновение через мембрану с использованием БСА в качестве модельной биомакромолекулы-загрязнителя. С увеличением гидрофильности мембраны CD-CNF3 и CD-CNF4 становились тантовыми. С увеличением гидрофильности мембраны CD-CNF3 и CD-CNF4 были менее загрязнены с более низким общим коэффициентом загрязнения (рис. 6а), а мембрана CD-CNF3 показала подходящее восстановление потока. Поскольку нормализованный поток воды оставался на уровне 68 % (FRR) после обработки мембраны CD-CNF3, морфология поверхности CD-CNF3 как и CD-CNF1 (рис. 6б), так и CD-CNF4 (рис. 6в), макромолекулярный загрязнитель плотно уложен без лапонита (рис. 6в). Однако на поверхности CD-CNF3 к загрязняющему веществу было прикреплено всего несколько молекул БСА (рис. 6д), поскольку БСА имеет низкую совместимость с гидрофильными мембранами (рис. 6д), поскольку БСА имеет низкую совместимость с гидрофильными мембранами и легко смывается с поверхности мембран. Был показан результат, что мембраны CD-CNF3 обладают подходящими противообрастающими свойствами. Мембраны CD-CNF3 обладали подходящими противообрастающими свойствами.

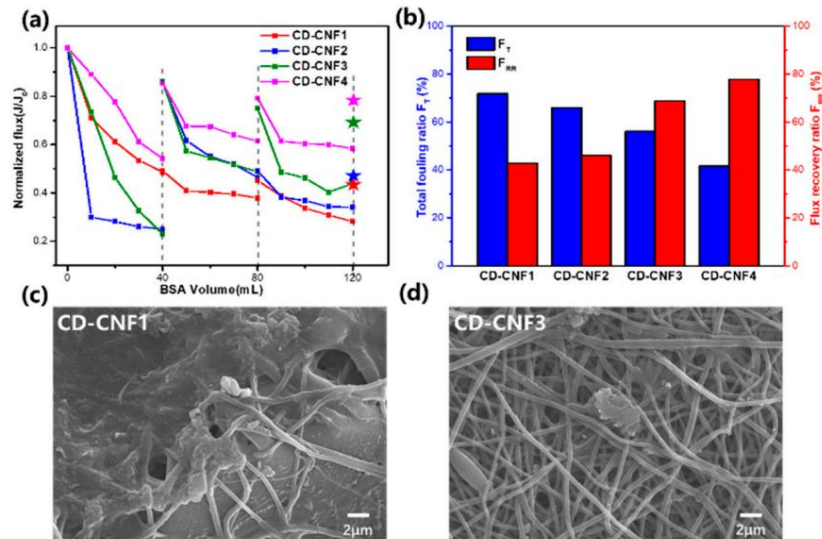


Рис. 6. (а) Нормализованный поток CD-CNF мембраны при обработке раствором БСА. (б) FT (всего коэффициент загрязнения) и FRR (коэффициент восстановления потока) CD-CNF мембран. (в) SEM изображения мембран CD-CNF1 (с) CD-CNF3 (д) после обработки раствором БСА и промывки водой.

4. Дискуссия

4. Обсуждение

Таким образом, мембраны из шитых нановолокон, состоящие из HP-β-CD, ПВС и

лапонит были успешно получены методами электроформования и сшивки в парах ГК.

Мембраны CD-CNF3 и мембраны CD-CNF4 (а сшивка паром GA продемонстрировала превосходную прочность и стабильность мембраны CD-CNF3 (прочность на разрыв 10.047 МПа, 1 м 26 бар 1).

Внутренняя полость нановолокна, состоящая из нановолокна, обладающего превосходной стабильностью к анионным красителям, получила

различные преимущества и недостатки. В частности, нановолокна защищают мембраны с

методом электроформования и процесс сшивки в парах, обеспечивая достаточное количество сточных вод

мембраны с каналом транспорта воды, обеспечивающие сверхбыстрое HP-β-CD и

разделение сточных вод красителей. Благодаря слабой конкуренции молекулярной адсорбции наблюдается

HP-β-CD и электростатическое взаимодействие, в отличие от лапонита, мембраны CD-CNF3, обеспечивающей

высокоэффективное разделение катионных и анионных красителей. Кроме того, супергидрофильность

продемонстрировала замечательную степень отторжения (более 99%) по отношению к катионным

красителям, а поверхность способствовала подходящим противообрастающим свойствам, что привело к лучшей

качестве поверхности способствовало получению подходящих противообрастающих свойств, что привело к лучшей

повторной подготовке, что имеет большой потенциал применения при очистке сточных вод с красителями.

Дополнительные материалы. Следующую вспомогательную информацию можно загрузить по адресу <https://www.mdpi.com/article/10.3390/chemistry6040029/s1>.

Рисунок S1: FTIR-спектры мембран-субстратов; Рисунок S2: СЭМ

мембран субстрата; Рисунок S3: XPS-спектры с деконволюцией на уровне ядра C 1s

для мембран CD-CNF2 и CD-CNF4 соответственно; Рисунок S4: Результаты СЭМ и диаметр нановолокна

распространение CD-CNF; Рисунок S5: Изображения поперечного сечения CD-CNF; Рисунок S6: Результаты SEM

мембран после замачивания в воде; Рисунок S7: Содержание воды в мембранах CD-CNF;

Рисунок S8: Фотографии подготовленных мембран после фильтрации; Рисунок S9: УФ-видимый спектр

анионные красители после фильтрации CD-CNF; Рисунок S10: Поверхностный дзета-потенциал CD-CNF при pH 7;

Рисунок S11: УФ-видимый спектр катионных красителей после фильтрации CD-CNF; Рисунок S12: Отбраковка мембран CD-CNF для трех красителей за четыре цикла фильтрации/регенерации; Таблица S1: Проницаемость CD-CNF для трех видов органических растворителей; Видео S1: Процесс фильтрации раствора кармоизина с помощью мембраны CD-CNF3; Видео S2: Разделение смешанных красителей с помощью мембраны CD-CNF3.

Вклад авторов: концептуализация, XX и YC; методология, XX и YZ; проверка, XX; формальный анализ, XX и YZ; расследование, XX; ресурсы, XX; курирование данных, XX; письменная — подготовка первоначального черновика, XX; написание — обзор и редактирование, XX, YC и YL; администрация проекта, YC и YL; приобретение финансирования, YC. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование: Исследование финансировалось Национальным фондом естественных наук Китая (грант № 22131008), Лабораторией устойчивой химической трансформации Хайхэ и Фондом фундаментальных исследований центральных университетов (Университет Нанкай).

Заявление о доступности данных: данные, представленные в этом исследовании, доступны по запросу у соответствующего автора.

Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Рекомендации

1. Лин, Дж.; Йе, В.; Се, М.; Со, ДХ; Луо, Дж.; Ван, Ю.; Ван дер Брюгген, Б. Воздействие на окружающую среду и очистка сточных вод, содержащих красители. *Нат. Преподобный Earth Environ.* 2023, 4, 785–803. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
2. Шанкер, У.; Рани, М.; Джассаль В. Разложение опасных органических красителей в воде под действием наноматериалов. *Окружающая среда. хим. Летт.* 2017, 15, 623–642. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
3. Ткачик А.; Митровска, К.; Посиняк А. Синтетические органические красители как загрязнители водной среды и их значение для экосистем: Обзор. *наук. Тотальная среда.* 2020, 717, 137222. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
4. Самучивал, С.; Нааз, Ф.; Кумар, П.; Ахаммад, СЗ; Малик, А. Оценка жизненного цикла технологии последовательного анаэробно-аэробного реактора на основе микробов, разработанной на месте для очистки сточных вод текстильной промышленности. *Окружающая среда. Рез.* 2023, 234, 116545. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
5. Яннакис, С. Обзор концепций, последних достижений и нишевых применений (фото) процесса Фентона, помимо очистки воды / сточных вод: функционализация поверхности, обработка биомассы, борьба с раком и другие медицинские применения. *Прил. Катал. Б Окружающая среда.* 2019, 248, 309–319. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
6. Ян, Дж.; Хуанг, Ю.; Мяо, Ю.Е.; Тжиу, WW; Лю, Т. Мембраны из поливинилового спирта и полиакриловой кислоты, покрытые полидопамином, как эффективный адсорбент красителей с хорошей пригодностью к вторичной переработке. *J. Hazard. Mater.* 2015, 283, 730–739. [\[CrossRef\]](#)
7. Леуджо Така, А.; Фоссо-Канкеу, Э.; Пиллэй, К.; Янкоу Мбианда, Х. Металлические наночастицы украшают наногубку из фосфорилированных углеродных нанотрубок и циклодекстрина для адсорбции трихлорэтилена и красителя Конго красного из сточных вод. *Дж. Энвайрон. хим. англ.* 2020, 8, 103602. [\[CrossRef\]](#)
8. Саркар, П.; Модал, С.; Каран, С. Ультраселективные и высокопроницаемые полиамидные нанопленки для ионной и молекулярной нанофильтрации. *Адв. Функц. Матер.* 2021, 31, 2007054. [\[CrossRef\]](#)
9. Чжан Л.; Гуань, Х.; Чжан, Н.; Цзян, Б.; Сан, Ю.; Ян, Н. Рыхлая NF-мембрана путем прививки наночастиц TiO₂-HMDI на Субстрат PES/β-CD для разделения красителя и соли. *Сентябрь Пуриф. Технол.* 2019, 218, 8–19. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
10. Карки С.; Гохайн, МБ; Ядав, Д.; Такаре, Северная Каролина; Павар, РР; Хазарика, С.; Инголе, П.Г. Создание каналов быстрого транспорта воды в тонкопленочных нанокомпозитных мембранах на основе 2D мезопористых нанолитов. *Опреснение* 2023, 547, 116222. [\[CrossRef\]](#)
11. Сюй, В.; Чен, Ю.; Сюй, В.; Ву, Х.; Лю, Ю. Электропрядение ориентированного самоочищающегося пористого сшивающего полимера для эффективных красителей Удаление. *Адв. Матер. Интерфейсы* 2020, 7, 2001050. [\[CrossRef\]](#)
12. Чжан, В.; Чжэн, З.; Лин, Л.; Чжан, Х.; Бэ, М.; Ли, Дж.; Се, Дж.; Диао, Г.; Я, Х.-Дж.; Пяо, Ю.; и другие. Сверхбыстрый синтез встроенного в графен циклодекстрин-металл-органического каркаса для супрамолекулярной селективной поглощающей способности и характеристик суперконденсатора. *Адв. наук.* 2023, 10, 2304062. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
13. Чжан С.; Чжоу, Дж.; Ли, Х. Наноканальная мембрана с хиральным ковалентным органическим каркасом для энантиоразделения. *Энджью. хим. Межд. Эд.* 2022, 61, e202204012. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
14. Чжан С.; Буссуар, И.; Ли, Х. Избирательное восприятие и транспорт в бионических наноканалах на основе макроциклической химии хозяин-гость. *Подбородок. хим. Летт.* 2021, 32, 642–648. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
15. Цзян З.; Донг, Р.; Эванс, АМ; Бьер, Н.; Ибрагим, Массачусетс; Ли, С.; Ансельметти, Д.; Дихтель, WR; Ливингстон, А.Г. Выровненные макроциклические поры в ультратонких пленках для точного молекулярного просеивания. *Природа* 2022, 609, 58–64. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
16. Алсбайн, А.; Смит, Би Джей; Сяо, Л.; Линг, Ю.; Хелблинг, Делавэр; Дихтель, В.Р. Быстрое удаление органических микрозагрязнителей из воды с помощью пористого полимера β-циклодекстрина. *Природа* 2016, 529, 190–194. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[PubMed\]](#)
17. Хуанг, Т.; Пуспасари, Т.; Нуньес, СП; Пайнеманн, К.-В. Ультратонкие 2D-слоистые циклодекстриновые мембраны для высокоэффективной нанофильтрации органических растворителей. *Адв. Функц. Матер.* 2020, 30, 1906797. [\[CrossRef\]](#)
18. Чжу, Б.; Шао, Р.; Ли, Н.; Мин, К.; Лю, С.; Сюй, З.; Цянь, Х.; Ван, Л. Прогресс мембран на основе циклодекстрина в очистке воды: специальная трехмерная чашеобразная структура для достижения превосходного разделения. *хим. англ. J.* 2022, 449, 137013. [\[CrossRef\]](#)

19. Вильялобос, ЛФ; Хуанг, Т.; Пайнеманн, К.-В. Циклодекстриновые пленки с быстрым переносом растворителей и избирательной проницаемостью по форме. *Адв. Матер.* 2017, 29, 1606641. [\[CrossRef\]](#)
20. Он, Ю.; Мiao, Дж.; Цзян, З.; Ту, К.; Ян, Х.; Чен, С.; Чжан, Л.; Чжан Р. Улучшение противообращающих свойств и потока пермеата композитной нанофильтрационной мембраны из полых волокон с использованием β-циклодекстрина. *наук. Отчет* 2019, 9, 12435. [\[CrossRef\]](#)
21. Мао, Х.; Чжан, Х.; Ли, Ю.; Сюэ, Ю.; Пей, Ф.; Ван, Дж.; Лю, Дж. Настраиваемые свойства проникновения растворителя тонкопленочной нанокомпозитной мембраны путем создания двойных путей с использованием циклодекстринов для нанофильтрации органических растворителей. *АСУ Сустейн. хим. англ.* 2015, 3, 1925–1933. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
22. Гозали Балканлоо, П.; Махмудян, М.; Хоссейнзаде, М.Т. Сравнительное исследование MMT-Fe₃O₄/PES, MMT-HBE/PES, и MMT-активированные кислотой/PES мембраны со смешанной матрицей. *хим. англ. J.* 2020, 396, 125188. [\[CrossRef\]](#)
23. Ву, Х.; Лю, Ю.; Мао, Л.; Цзян, К.; Анг, Дж.; Лу, Х. Легирование полисульфоновой ультрафильтрационной мембраны наногибридом TiO₂-PDA для одновременная самоочистка и самозащита. *Дж. Член. наук.* 2017, 532, 20–29. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
24. Шен, Л.; Ченг, Р.; Йи, М.; Хунг, Западная Юг; Джапип, С.; Тиан, Л.; Чжан, Х.; Цзян, С.; Ли, С.; Ван, Ю. Мембраны на основе полиамида со структурной однородностью для сверхбыстрого молекулярного просеивания. *Нат. Коммун.* 2022, 13, 500. [\[CrossRef\]](#)
25. Чжао, Ц.; Лю, Ю. Мезопористые полимеры, сшитые макроциклом, для сверхбыстрого разделения органических красителей. *хим. Коммун.* 2018, 54, 7362–7365. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
26. Сюй, В.; Ли, Г.; Цюй, Х.; Ма, К.; Чжан, Х.; Ченг, Дж.; Ли, Х. Специфическое удаление перфтороктановой кислоты на основе пиллар[5]арена. Наноканальная мембрана с полимерной начинкой. *АСУ Нано* 2023, 17, 19305–19312. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
27. Сюй, В.; Чен, Ю.; Лю, Ю. Направленный перенос воды. Нановолокнистые пористые мембраны Janus для фильтрации твердых частиц и адсорбции летучих органических соединений. *Приложение ACS. Матер. Интерфейсы* 2021, 13, 3109–3118. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)
28. Чжан, В.; Чай, Х.; Диао, Г. Высокопористая нановолокнистая мембрана, функционализированная циклодекстрином, путем кислотного травления. *Коллоиды Прибой. А Физикохим. англ. Асп.* 2019, 582, 123907. [\[CrossRef\]](#)
29. Челебиоглу А.; Уяр, Т. Электропрядение нановолокон из неполимерных систем: бесполимерные нановолокна из циклодекстрина производные. *Наномасштаб* 2012, 4, 621–631. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
30. Чжао, Р.; Ван, Ю.; Ли, Х.; Сан, Б.; Ван, К. Синтез электропряденных нановолоконных мембран на основе бета-циклодекстрина для высокоэффективной адсорбции и разделения метиленового синего. *Приложение ACS. Матер. Интерфейсы* 2015, 7, 26649–26657. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
31. Ли, Р.; Ду, Дж.; Цзян, К.; Ли, Дж.; Се, З.; Лян, Дж.; Рен, Х. Получение и противомикробная активность производного β-циклодекстрина. сополимеры/нановолокна ацетата целлюлозы. *хим. англ. Дж.* 2014, 248, 264–272. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
32. Тан, Ю.-Дж.; Шен, Б.-Дж.; Хуанг, Б.-К.; Жан, З.-М.; Сюй, З.-Л. Тонкопленочные композитные нанофильтрационные мембраны с высокой селективностью и трехмерной микроструктурой, изготовленные путем включения бета-циклодекстрина. *Сентябрь Пуриф. Технол.* 2019, 227, 115718. [\[CrossRef\]](#)
33. Шан, С.; Чiu, К.-Л.; Цзян, С. Синтез иммобилизованного эоадсорбента поливиниловый спирт/циклодекстрин и его применение для удаление ибупрофена из сточных вод фармацевтических предприятий. *Дж. Прил. Полим. наук.* 2017, 134, 44861. [\[CrossRef\]](#)
34. Ахмад Дж.; Вэнь, Х.; Ли, Ф.; Ван, Б. Новые треугольные мембраны, модифицированные наночастицами серебра, для улучшенной защиты от обрастания производительность. *РСК Адв.* 2019, 9, 6733–6744. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)
35. Ван, К.; Джу, Дж.; Тан, Ю.; Хао, Л.; Может.; Ву, Ю.; Чжан, Х.; Ся, Ю.; Суи, К. Контролируемый синтез мембран из нановолокон из альгината натрия, полученных электропрядением, для многократной адсорбции и разделения метиленового синего. *Углевод. Полим.* 2019, 205, 125–134. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)
36. Тиан, Х.; Юань, Л.; Ван, Дж.; Ву, Х.; Ван, Х.; Сян, А.; Ашок, Б.; Раджулу, А.В. Электроформование поливинилового спирта в сшитые нановолокна: подход к созданию функционального адсорбента тяжелых металлов. *Дж. Хазард. Матер.* 2019, 378, 120751. [\[Перекрестная ссылка\]](#) [\[ПабМед\]](#)
37. Ядав, Д.; Карки, С.; Гохайн, МБ; Инголе П.Г. Разработка процесса удаления микрозагрязнений с использованием тонкопленочных нанокомпозитных мембран, полученных новым зеленым методом межфазной полимеризации в паровой фазе. *хим. англ. J.* 2023, 472, 144940. [\[CrossRef\]](#)
38. Группусо, М.; Иорио, Ф.; Турко, Г.; Марсич, Э.; Поррелли, Д. Хитозановые повязки на основе хитозана, модифицированные гиалуроновой кислотой и лактозой. Критические аспекты сшивания и стабильности. *Углевод. Полим.* 2022, 288, 119375. [\[CrossRef\]](#) [\[ПабМед\]](#)
39. Прасаннан, А.; Удомсин Дж.; Цай, Х.-К.; Ван, К.-Ф.; Лай, Ж.-Ю. Прочные подводные суперолеофобные мембраны с биотехнологическими мультислойми каррагинана/лапонита для эффективного удаления эмульсий, ионов металлов и органических красителей из сточных вод. *хим. англ. J.* 2020, 391, 123585. [\[CrossRef\]](#)
40. Ян, Х.; Лин, Л.; Лю, З.; Ян, Дж.; Ченг, К.; Ма, В.; Сюй, М.; Тан, Ф.; Ван, К.; Ли, Х.; и другие. Изготовление устойчивых к растворителям полиимидных мембран для эффективного разделения красителей и солей с использованием стратегии «внутреннего привода». *Сентябрь Пуриф. Технол.* 2024, 332, 125843. [\[CrossRef\]](#)

Отказ от ответственности/Примечание издателя: Заявления, мнения и данные, содержащиеся во всех публикациях, принадлежат исключительно отдельному автору(ам) и соавторам(ам), а не MDPI и/или редактору(ам). MDPI и/или редактор(ы) не несут ответственности за любой вред людям или имуществу, возникший в результате любых идей, методов, инструкций или продуктов, упомянутых в контенте.