

染料废水处理技术

苗长瑞, 李可妮, 黄文俊

兰州交通大学化学化工学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2024年3月28日; 录用日期: 2024年5月24日; 发布日期: 2024年5月31日

摘要

染料废水通常具有高色度、高化学需氧量(COD)和高生物毒性等特点。因此为了减少环境危害和生态毒性, 研究人员开发了许多技术来处理染料废水, 针对染料废水的特性, 主要的处理方法有生物法、化学法和物理法。本文综述了染料废水的危害和主要的处理技术, 以此为后续研究提供一定的理论指导。

关键词

染料废水, 生物法, 化学法, 物理法

Dyes Wastewater Treatment Technology

Changrui Miao, Keni Li, Wenjun Huang

College of Chemistry and Chemical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Mar. 28th, 2024; accepted: May 24th, 2024; published: May 31st, 2024

Abstract

Dye wastewater is usually characterized by high color, high chemical oxygen demand (COD) and high biological toxicity. Therefore, in order to reduce the environmental hazards and ecotoxicity, researchers have developed many techniques to treat dye wastewater, and the main treatment methods for the characteristics of dye wastewater are biological, chemical and physical methods. In this review, the hazards of dye wastewater and the main treatment technologies are summarized to provide some theoretical guidance for subsequent research.

Keywords

Dye Wastewater, Biological, Chemical, Physical Methods



1. 引言

工业发展带给人们便利的生活条件,城市化进程改善了人们的居住环境,随着废水排放量的急剧增加,也加剧了环境污染。这些排放的废水主要来自用于纺织行业[1] [2] [3]、印染行业[4] [5]、造纸业[6] [7]、电镀行业[8]、冶金工业[9]和城市污水等[10],其主要成分为染料[11]、重金属[12]、无机和有机[13]污染物等。随着工业和科技的发展,工业染料产量越来越多,全球范围内每年生产的染料数量巨大,产生的印染工业废水问题也愈发严重[5]。纺织工业是世界上最具影响力的工业部门之一,约占全球染料市场的75%,全球每年约有28万吨纺织染料废水进入到水环境中[11] [14] [15],这不仅降低了水体的透光性,增加了水体的需氧量,而且对生态环境和人体健康都产生了严重的危害。因此,染料废水的处理正受到人们的密切关注。

2. 染料废水危害及染料废水处理方法

染料种类复杂繁多,按来源主要分为天然染料和合成染料,天然染料主要有植物染料、动物染料和矿物染料,合成染料主要有偶氮染料和非偶氮类染料[16];根据发色团结构可分为酸性染料、碱性染料、分散染料、活性染料、偶氮染料、重氮染料和蒽醌染料[17],如图1所示。

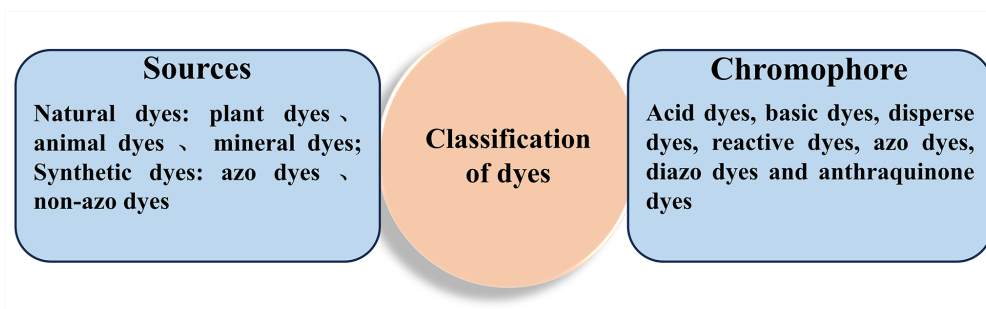


Figure 1. Classification of dyes

图 1. 染料的分类

染料废水排入水环境中会影响其生化需氧量(BOD)、化学需氧量(COD)、总溶解固体(TDS)、总悬浮固体(TSS)和 pH 值等[18],对水生生态系统和人类健康产生严重危害。例如,蒽醌类染料在外界环境下不易降解,会对淡水生物造成毒害,并导致遗传基因致突变性和致癌性[19];偶氮类染料在人类穿着的衣物及纺织品上常见,接触人体皮肤可能引发人体的酶和微生物组分解偶氮染料,从而可能产生诱变或致癌代谢物[20]。因此,为了保持经济发展和环境保护之间的平衡,可持续发展的理念在全世界越来越受到欢迎。许多行业也在不断地寻求生产更可持续的材料,以减少废物和有毒物质的产生,以促进人类和环境健康。当前,科研人员研究了许多方法来清除废水中的染料,主要有生物处理法、化学处理法和物理处理法。

2.1. 生物处理法

生物处理法指的是利用微生物、植物或酶从土壤、沉积物、空气或水等基质中去除(通过降解或吸附)

污染物的策略，生物法主要有好氧法、厌氧法及生物絮凝法。

2.1.1. 好氧法

有氧生物处理技术需在高游离氧化物的环境中，以有氧细菌为载体对染料完成分解，其过程将更加安全和平稳。在相应生化反应后，有机质就会逐级发生能量释放，由最初的高能位逐渐降低能位，而最后无机化合物的稳定程度也会逐步递增，从而达到无害化的目的[21]。Zhang 等[22]采用好氧颗粒污泥(AGS)作为一种耐盐生物废水处理技术，探讨低盐度(1.0%)下酸性橙 7(AO7)降解的增强机制，如图 2 所示。结果表明，AGS 结构和反应器性能几乎不受不同 AO7 浓度(5~10 mg/L)的影响。与无盐条件相比，在 1.0% 盐度条件下，由于 AO7 脱色细菌(如不动杆菌)和功能酶(如 FMN 依赖性偶氮还原酶)的富集，AO7 去除效率提高了 9.9%~19.0%。涉及关键代谢功能(例如碳代谢和氧化磷酸化)的上调基因促进电子和能量产生，从而促进 AO7 脱色和降解。

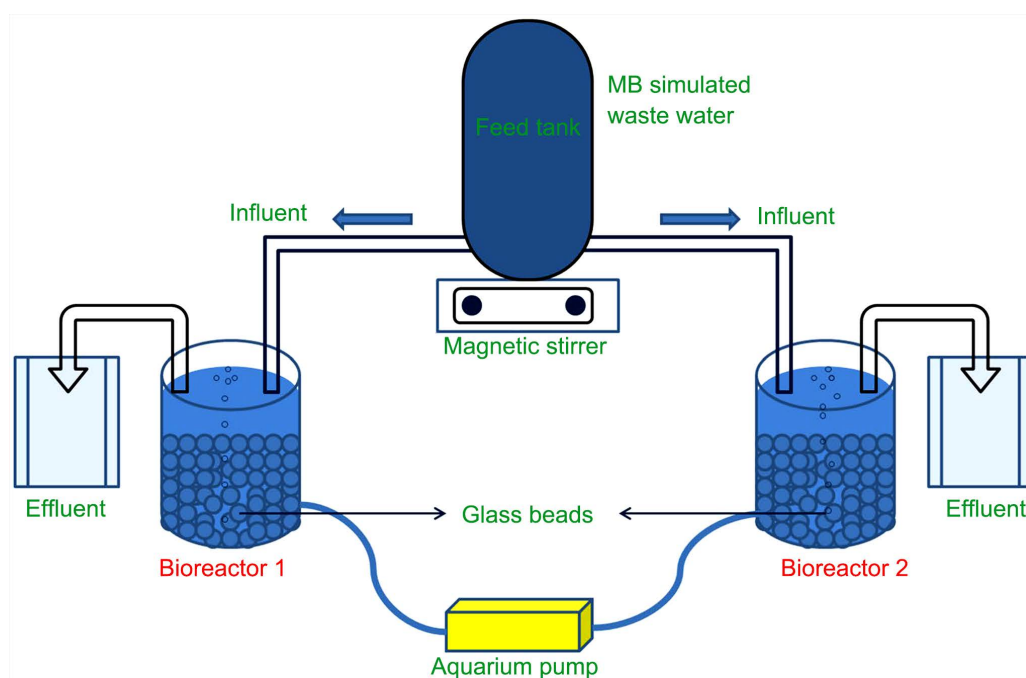


Figure 2. Microbial aerobic degradation of acid orange 7 dye [22]

图 2. 微生物好氧法降解酸性橙 7 染料[22]

好氧法在处理染料废水方面具有降解有机物、脱色效果好、处理周期短、适应性强等优点，但也存在能耗高、污泥产量大、对特定染料处理效果不佳以及操作管理复杂等缺点。

2.1.2. 厌氧法

厌氧处理法是指利用厌氧菌对有机物进行降解和转化的过程。染料废水中的酸性染料与活性染料是偶氮化合物，偶氮染料存在的偶氮键具有吸电子的特性，会抵抗氧化降解，所以降解这类染料需要采用厌氧法[23]。Wang 等[24]以不同原料为原料，在不同的热解条件下制备多种生物质炭，如图 3 所示。添加任何种类的生物炭都能显著提高 RR2 的厌氧脱色效率，其中一些生物炭的脱色效果最好。生物炭作为促进电子传递的媒介，丰富了功能性发酵细菌群落，为微生物定植提供了表面，并刺激了 EPS 中氧化还原活性物质的分泌。利用随机森林方法建立了由生物炭特性预测 RR2 脱色效率的模型，其中生物炭的电导率、H/C 和 O/C 是最重要的三个影响因素。

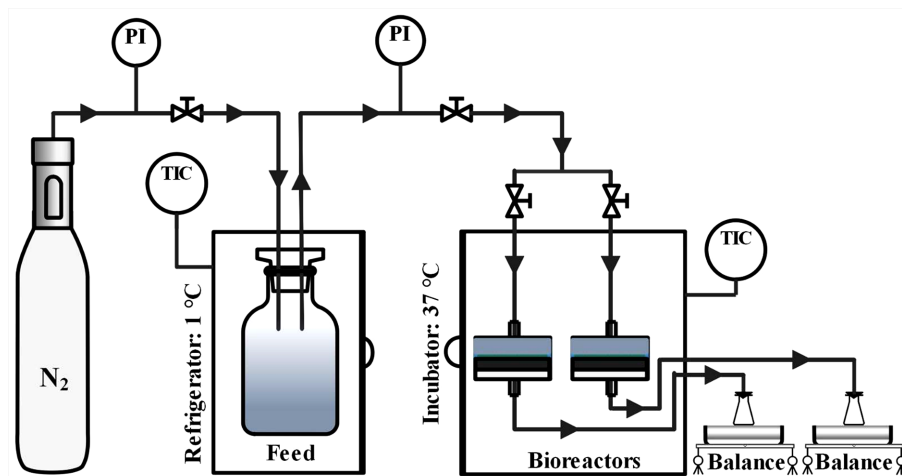


Figure 3. The proposed mechanism for the enhanced biodegradation of RR2 by different types of biochar [24]

图 3. 不同类型生物炭增强 RR2 生物降解的机制[24]

厌氧法在处理染料废水方面具有一定的优势,如高效降解有机物、节省能源和减少污泥产生等。然而,该方法也存在一些缺点,如处理周期长、对水质波动敏感以及产物难以处理等。因此,在实际应用中,需要综合考虑厌氧法的优缺点,结合实际情况选择合适的废水处理方法。

2.1.3. 生物絮凝法

生物型絮凝剂作为由微生物制备的天然大分子絮凝剂,主要采用微生物发酵法来进行,其使用模式也十分明确,相比于传统絮凝剂的功效要更为明显[21]。Wagner 等[25]提出了一种通过碱性水解啤酒废酵母(酿酒工业的残余物)生产的生物絮凝剂方法,并对其在沉淀难降解染料方面的性能进行了评估,如图 4 所示。在两种不同的体系中评估生物絮凝剂的性能,一种是含有罗丹明的真实纺织废水,另一种是含有黄素的合成溶液。考虑了絮凝变量 pH、温度、搅拌和絮凝剂剂量的影响。对罗丹明和黄素的去除率分别达到了 80%和 90%以上。这项工作首次表明了从废啤酒酵母中提取生物絮凝剂的可行性,并展示了其在纺织废水中沉淀难降解化合物方面的潜在适用性。

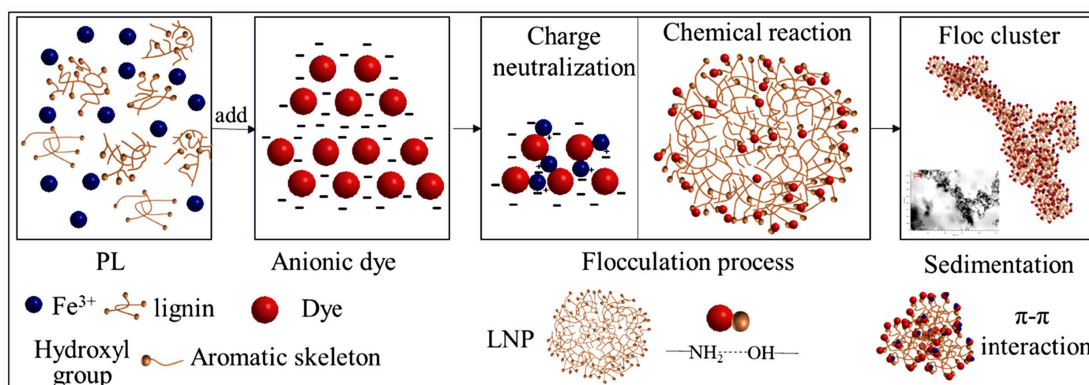


Figure 4. Production of bioflocculants from spent brewer's yeast and its application in the treatment of effluents with textile dyes [25]

图 4. 啤酒废酵母生物絮凝剂的制备及其在纺织染料废水处理中的应用[25]

虽然生物法处理染料废水因其成本较低、不产生二次污染、对环境友好等优点,应用愈加的广泛,但

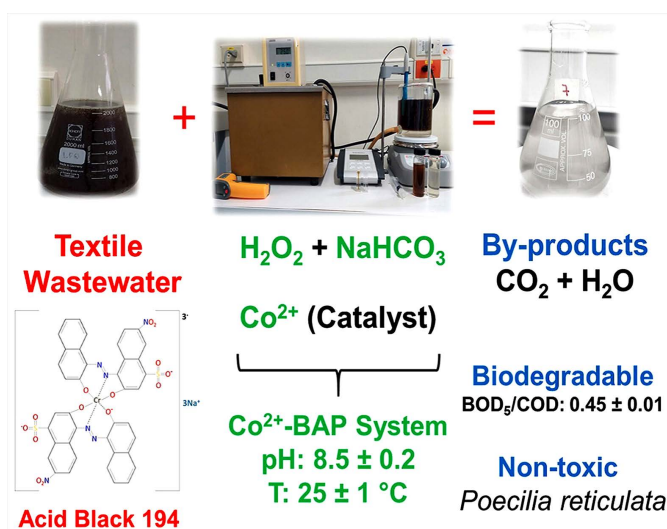
是生物法用的微生物脱色范围单一，去除效率不高，并且需要的操作条件苛刻，用生物法去除染料的机理尚不明确，这些问题都需要解决，因此，生物法处理染料废水的应用受到了一定的限制。

2.2. 化学处理法

在染料废水的处理方法中，化学法是应用最广泛的方法，常用到的化学法有化学氧化法[26]、电化学法[27]和化学絮凝法[28]。

2.2.1. 化学氧化法

化学氧化法是利用氧化作用破坏染料的共轭体系或发色基团，是染料废水脱色降解的主要方法[29]，这种方法不仅具有较高的处理效率，能够快速应对大量染料废水的处理需求，还可以处理各种类型的染料废水，包括活性染料、酸性染料、碱性染料等，具有较广的适用范围。Francisco J.等[30]采用基于中心复合设计的响应曲面法(RSM)对偶氮染料酸性黑 194 污染的纺织废水(TWW)在 Co^{2+} 催化的碳酸氢盐活化过氧化氢(BAP)体系中的降解进行了优化，应用方差分析(ANOVA)技术来确定显著变量及其对 TWW 降解的个体和交互影响，如图 5 所示。结果表明，在 25°C 和 $45\ \mu\text{M}\ \text{Co}^{2+}$ 的条件下， H_2O_2 和 NaHCO_3 降解 TWW 的最佳试剂浓度分别为 787.61 和 183.34 mM。在此条件下，脱色率为 99.40%，矿化率达到 32.20%，化学需氧量去除率达到 52.02%。此外，用孔雀鱼(*Poecilia reticulata*)评估了纺织废水氧化前后的急性毒性显示，经过 Co^{2+} -BAP 系统处理后，死亡率总体下降。可见， Co^{2+} -BAP 氧化系统除了实现完全脱色和部分矿化外，还提高了处理水的可生化性和处理后水的毒性，是一种很有潜力的纺织废水处理方法。



等[31]通过一种无溶剂且简单的环保途径制备了嵌入 WSe₂-CuO 电催化剂的可生物降解纤维素纸基电极，以低成本、地球资源丰富的石墨棒为阳极，通过阳极氧化反应过程实现了废水中有机染料污染物的净化，阴极侧同时完成绿色氢气的产生，如图 6 所示。作为一种高效且环境友好的方法，通过阳极氧化反应在阳极观察到有机染料的降解，降解效率高达 94%。

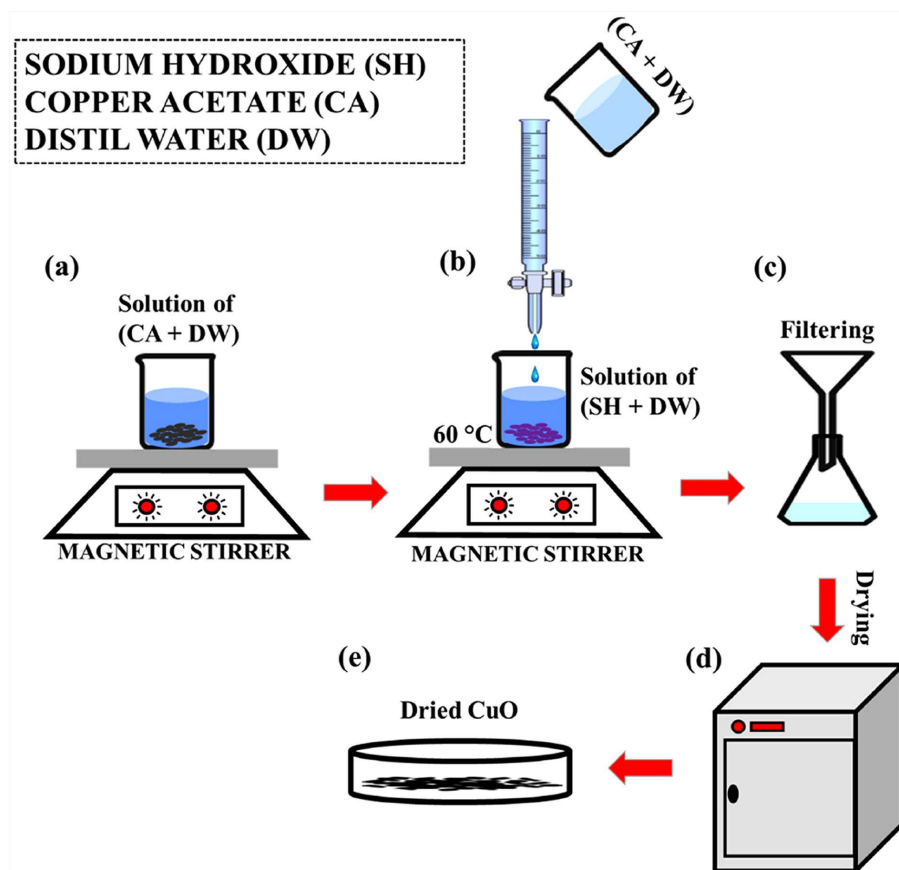


Figure 6. Schematic of Direct and Indirect anodic oxidation reaction during degradation of dye wastewater [31]

图 6. 染料废水降解过程中直接和间接阳极氧化反应的示意图[31]

虽然电化学法在处理染料废水方面具有高效降解有机物、去除重金属离子和降低色度等优点。然而，该方法也存在一些缺点，如能耗较高、电极材料的选择和更换问题、可能产生二次污染以及处理效果受水质影响等。

2.2.3. 化学絮凝法

化学絮凝法是在一定的条件下，将一定量的絮凝剂加入废水中，由于絮凝剂与染料分子之间电荷相互中和、絮凝并相互聚集，形成较大的颗粒，最终沉淀，达到去除染料的目的。Wu 等[32]本文以硫酸盐木质素、丙烯酰胺和 3-氯-2-羟丙基三甲基氯化铵为原料，采用一锅法制备了木质素絮凝剂(CPKL)。通过对合成条件的优化，使其絮凝性能得到明显改善。以阴离子偶氮染料刚果红为模拟污染物，考察了其絮凝性能，如图 7 所示。考察了絮凝剂投加量、pH 值、染料初始浓度等因素对处理效果的影响。烧杯试验结果表明，CPKL 具有絮凝窗口宽、pH 适应性强、在不同染料浓度下都能保持较高的脱色率等优点。电荷中和是主要的絮凝机制，吸附架桥只有在较高的染料浓度时才表现出明显的效果。

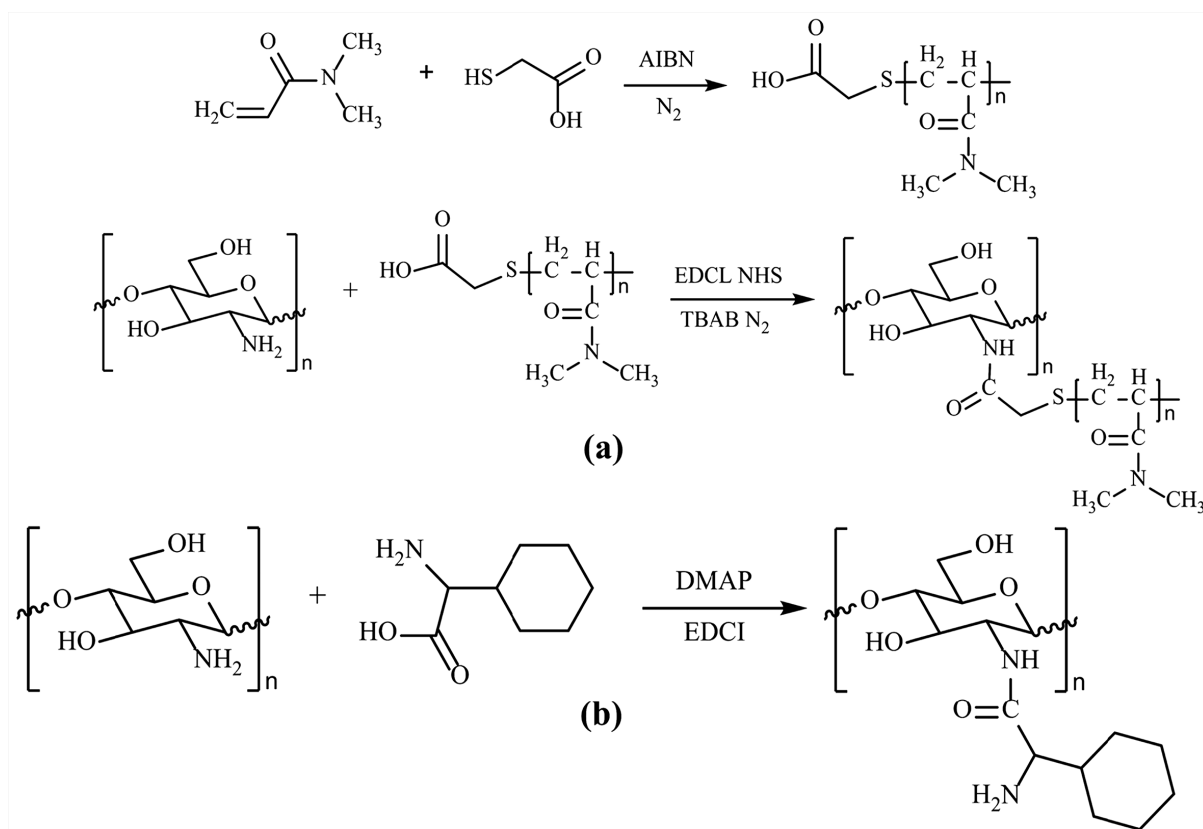


Figure 7. Schematic diagram of flocculation mechanism [32]

图 7. 絮凝机理示意图[32]

化学氧化法、电化学法、絮凝法、光催化氧化法等这些主要的化学处理方法，在一定程度上能处理染料废水，但是使用这些方法需要高能耗、大量的其他辅助化学药品和合适的设备，这些条件限制了化学方法的使用；此外，使用化学方法处理染料废水的过程中，还会产生有毒物质和副产物，这也是化学法面临的挑战。

2.3. 物理处理法

物理法在处理染料废水过程中，不添加化学试剂，通过物理作用对染料废水进行处理。常用的物理法有膜分离法[33]和吸附法等。

2.3.1. 膜分离法

膜分离是指在外力作用下，以分离膜为核心屏障，将染料分子截留在一侧，溶液截留在另一侧，以实现选择性分离的目的。Nawaz 等[34]开发了一种新型聚苯胺(PANI)/聚偏二氟乙烯(PVDF)杂化膜来去除纺织废水染料，如图 8 所示。通过增加 PVDF 基质中聚苯胺的浓度，杂化膜的接触角减小，从而增强杂化膜的亲水性。与纯 PVDF 膜相比，杂化膜的膜性能，包括孔隙率、防污性能、溶剂含量和纯水通量均得到改善。纯化水通量从 28 L·m⁻²·h 提高到 47 L·m⁻²·h，这表明 PANI 对杂化膜亲水性的影响。在杂化膜中，3P 在 0.1 MPa 操作压力下表现出 85% 的染料截留率。

膜分离法虽然具有分离效率高、工艺简单、操作方便、无污染等优点，但是在实际应用中存在运行费用高、易堵塞、需定期化学清理等缺点，限制了其在染料废水处理中的应用[35]。

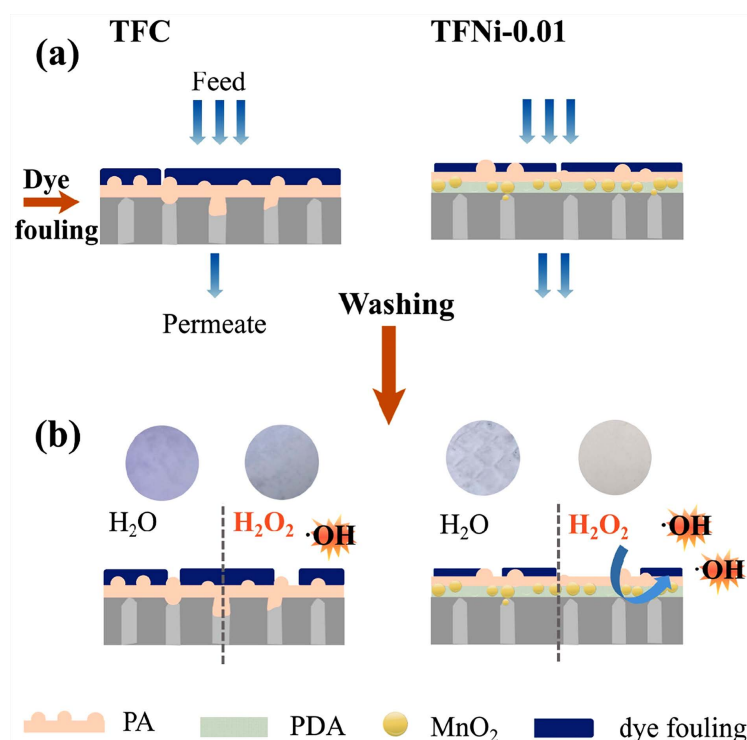


Figure 8. A schematic representation of membrane manufacturing process [34]
图 8. 膜的制备过程示意图[34]

2.3.2. 吸附法

吸附法是利用一些具有多孔性质的吸附剂对废水进行净化，将其中的某些组分吸附到自身表面，再通过分离的方法把这些吸附剂从废水中分离出来，从而达到净化废水的效果[5]。它是目前处理染料废水最常用的方法之一。常见的吸附剂有活性炭[36]、离子交换树脂、天然材料和水凝胶等。

(a) 活性炭吸附剂

活性炭是最常用的吸附材料，其具有发达的孔隙结构、大比表面积以及表面丰富的官能团，去除污染物能力强的优点[37]。Cao 等[38]采用深度共晶溶剂(DES)改性和 KOH 活化两步耦合策略，以园艺废弃物为原料制备了一种新型的亚甲基蓝(MB)吸附剂(p-DES-GHCKOH)。研究了 p-DES-GHCKOH 的性质和吸附行为，并在实验和密度泛函理论计算的基础上提出了吸附机理，如图 9 所示。结果表明，p-DES-GHCKOH 具有良好的孔结构，比表面积为 883.95 m²/g，且含有大量含氧官能团，在 25℃时，对亚甲基蓝的最大吸附容量为 351.72 mg/g。

活性炭法虽然适用范围广，吸附速率快，材料简单，但是，活性炭吸附法的缺点也很明显，例如价格昂贵，不同材料制备的活性炭性能不同，选择性差，使用后的活性炭处理复杂，再生性能差等，这些缺点限制了活性炭的广泛使用。

(b) 离子交换树脂

离子交换树脂主要有阴离子交换树脂和阳离子交换树脂。当离子在物质的两相之间交换时，产生离子交换过程。当不溶相与包含相同电荷的离子的溶液接触时，可以发生交换，交换量的大小取决于溶液中的离子浓度以及它们对溶液相比对不溶相的偏好[39]。Monika Wawrzkiwicz 等[40]采用具有叔胺官能团的阴离子交换树脂 Amberlyst A21 (A21)从废水中吸附 C.I.直接红 23 (DR23)、C.I.直接橙 26 (DO26)和 C.I.直接黑 22 (DB22)，其吸附机理如图 10 所示。应用朗缪尔等温线模型计算出 DO26 和 DO23 的单层吸附

容量分别为 285.6 mg/g 和 271.1 mg/g。阴离子和非离子表面活性剂的存在降低了染料的吸附量, 而 Na_2SO_4 和 Na_2CO_3 的存在则增强了染料的吸附。用 1 M 盐酸、1 M NaOH 和 1 M 氯化钠溶液在 50%v/v 甲醇中再生时, 其效率略有提高。

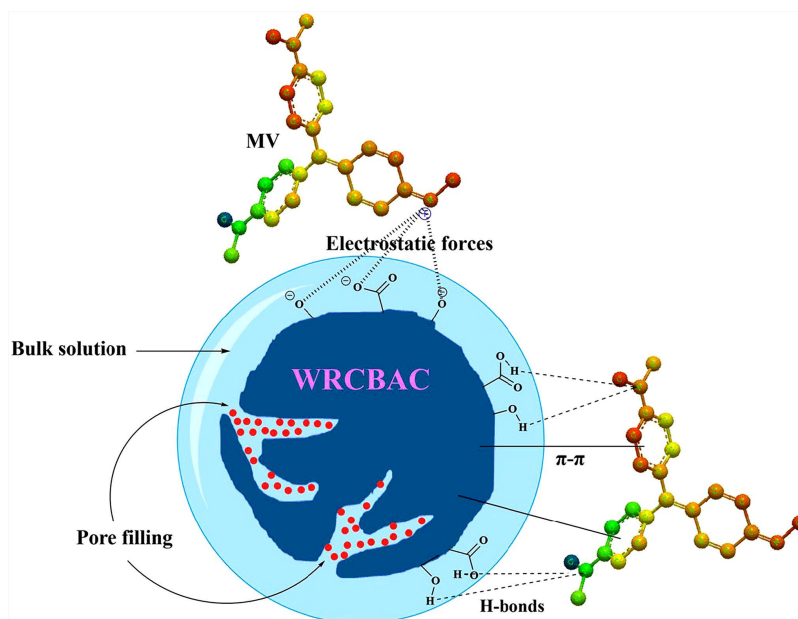


Figure 9. Adsorption mechanism of p-DES-GHCKOH for MB [38]

图 9. P-DES-GHCKOH 对亚甲基蓝的吸附机理[38]

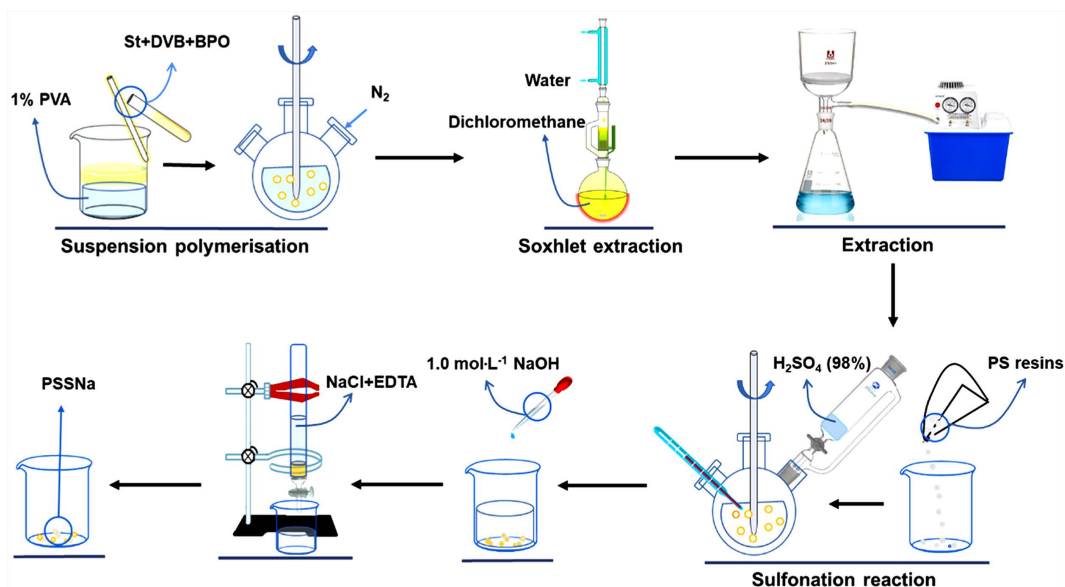


Figure 10. Possible interactions of direct dyes with A-21 resin [40]

图 10. 直接染料与 A-21 树脂可能发生的相互作用[40]

离子交换树脂法具有选择吸附性高, 吸附量大等优点, 但是吸附染料过后的树脂需要加入其他的化学试剂进行分离, 需要特定的设备清洗树脂, 废弃的树脂会造成二次污染, 不能生物降解, 这些缺点限制了离子交换树脂的应用范围[41]。

(c) 天然材料吸附剂

工业、农业、矿产等行业产生的废弃物作为天然吸附剂可用于染料废水的处理。例如，秸秆、粘土矿物、沸石等。这些材料具有优异的特性，如大的比表面积、可吸附的活性官能团、较好的孔隙结构，因此在水处理领域有一定的应用。Rao 等[42]在不同的物理化学条件下研究了不同类型的粘土矿物与两性离子染料罗丹明 B (RhB)之间的相互作用。结果表明，RhB 的吸收是由于两性离子染料胺基的阳离子端与带负电的粘土矿物表面之间的静电相互作用。因此，粘土矿物的阳离子交换能力对 RhB 的吸收发挥着重要作用。对于非膨胀粘土矿物高岭石和坡缕石，其对 RhB 的吸附仅限于蒙脱石的外表面和结构的外表面形貌，而膨胀粘土矿物蒙脱土对 RhB 的吸附主要受外表面和层间间隙的影响。天然材料虽然来源广泛，价格低廉，但是在染料废水处理过程中不能直接使用，需要对其进行一定的处理，且吸附过后会产生污泥，造成二次污染，这些缺点限制了天然材料的广泛使用[41]。

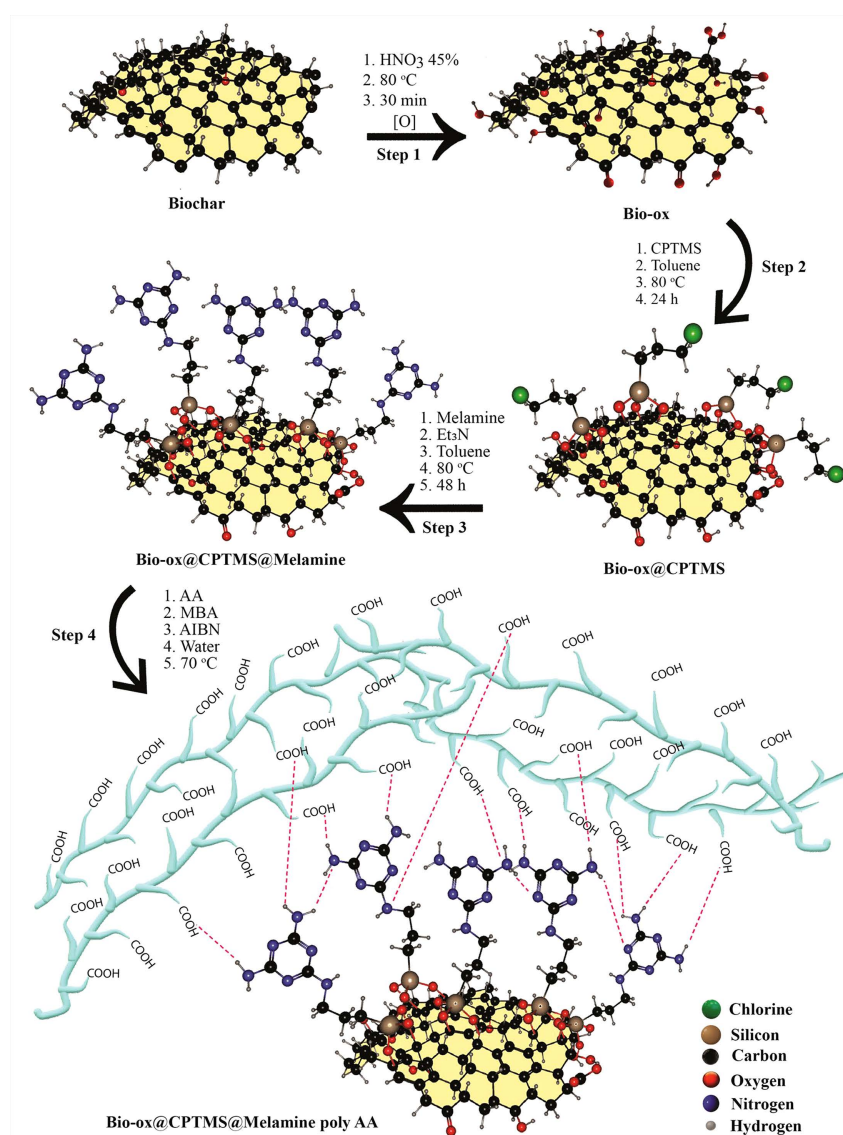


Figure 11. Schematic illustration of the preparation of the PNIPAM-CMC/GO injectable hydrogel reinforced with GO [44]

图 11. GO 增强的 PNIPAM-CMC/GO 可注射水凝胶的制备示意图[44]

(d) 水凝胶吸附剂

水凝胶聚合物作为一种新兴的吸附材料,能够吸水达到溶胀平衡保持原来的结构不被溶解,且因其材料来源广泛、含有丰富的官能团、内部呈现三维网络结构、再生性能好和可生物降解等特点,成为了理想的吸附材料[43]。

Huang 等[44]通过原位生成脲键,成功制备了基于聚(N-异丙基丙烯酰胺)和羧甲基纤维素、GO 增强的可注射水凝胶,并用于吸附处理阳离子染料废水,如图 11 所示。GO 的掺入显着提高了水凝胶的机械强度并缩短了凝胶化时间,以及与水凝胶基质对亚甲基蓝(MB)染料吸收的协同作用。该水凝胶可以有效去除水溶液中的 MB 染料。在 500 mg/L 和 2000 mg/L 的高浓度 MB 溶液中,吸附容量分别为 601.7 mg/g 和 1622.1 mg/g,去除效率分别为 90.4%和 60.4%。

水凝胶作为一种新兴的吸附材料,具有制备方法简单,良好的吸附效率等优点,但是在吸附染料后,将染料脱附,以及后续处理解吸液是需要考虑的问题。

3. 总结

通过以上分析,我们对以上处理方法作了比较,如表 1 所示。

Table 1. Comparison of dye wastewater treatment technologies

表 1. 染料废水处理技术对比

染料废水处理技术			
处理方法	优点	缺点	
生物法	好氧法	高效降解有机物、处理速度快、污泥产量少、易于操作和管理	能耗较高、对水质要求较高、可能产生二次污染、微生物适应性有限
	厌氧法	将有机物转化为生物气体(如甲烷)进行能源回收、处理效率高	对染料种类和浓度适应性差、处理周期长、受环境因素影响大(如温度、pH 值、营养物质等)
	生物絮凝法	处理效率高、环境友好、成本较低、适应性强	处理周期长、微生物种类和数量受限、受环境条件影响、固液分离难
物理法	吸附法	高效去除染料、操作简便、适用性广、可再生利用性好	吸附剂成本高、吸附容量有限、可能产生二次污染
	膜分离法	高效分离、节能环保、操作简便、适用范围广	膜容易污染、投资成本较高、处理效率受限
化学法	化学氧化法	高效去除色度、去除有毒物质、反应速度快、适用范围广	化学药剂消耗大、处理过程中可能产生副产物、设备投资及运行成本高、可能对环境产生长期影响
	化学絮凝法	去除效率高、适用性强、操作简便、处理费用相对较低	大量使用化学药剂、污泥产量大、处理效果受水质波动影响较大
	电化学法	高效降解有机物、可去除重金属离子、降低色度、易于操作和控制	能耗较高、需选择特定和电极材料需要定期更换、可能产生二次污染、处理效果受外界影响因素较大(如水质、温度和 pH 值等)

目前,染料废水处理技术已在实际应用中取得了显著成效。然而,随着染料种类的不断增多和废水成分的复杂化,现有的技术仍面临诸多挑战。因此,在实际应用中,需要根据废水特性和处理要求,综合考虑选择最适合的处理方法。同时,通过优化处理工艺和参数控制,以进一步提高染料废水处理的效果和经济性。研究者们也需进一步探索高效、环保的染料废水处理技术,以促进环境和生态的可持续发展。通过不断的研究和创新,我们相信会有更加有效的解决方案来应对染料废水处理的问题。

参考文献

- [1] Samsami, S., Mohamadizani, M., Sarrafzadeh, M.-H., *et al.* (2020) Recent Advances in the Treatment of Dye-Containing Wastewater from Textile Industries: Overview and Perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*, **143**, 138-163. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.034>
- [2] Kishor, R., Purchase, D., Saratale, G.D., *et al.* (2021) Ecotoxicological and Health Concerns of Persistent Coloring Pollutants of Textile Industry Wastewater and Treatment Approaches for Environmental Safety. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **9**, Article 105012. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.105012>
- [3] Kallawar, G.A. and Bhanvase, B.A. (2023) A Review on Existing and Emerging Approaches for Textile Wastewater Treatments: Challenges and Future Perspectives. *Environmental Science and Pollution Research*, **31**, 1748-1789. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31175-3>
- [4] 王艳辉, 陈利科, 钟云飞. 基于 MBR 生物接触氧化的印刷废水处理工艺研究[J]. 数字印刷, 2020(1): 77-110.
- [5] 刘俊逸, 黄青, 李杰, 等. 印染工业废水处理技术的研究进展[J]. 水处理技术, 2021, 47(3): 1-6.
- [6] Liu, P., Yang, X., Chen, W. and Hao, Y. (2024) Preparation of the Modified Chitosan Flocculant Introduced Acryloyloxyethyl Trimethyl Ammonium Chloride and 2-Acrylamido-2-Methyl Propane Sulfonic Acid for the Treatment of Papermaking Wastewater. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **682**, Article 132934. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.132934>
- [7] Esmaeeli, A., Sarrafzadeh, M.-H., Zeighami, S., *et al.* (2023) A Comprehensive Review on Pulp and Paper Industries Wastewater Treatment Advances. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **62**, 8119-8145. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c04393>
- [8] Rajoria, S., Vashishtha, M. and Sangal, V.K. (2022) Treatment of Electroplating Industry Wastewater: A Review on the Various Techniques. *Environmental Science and Pollution Research*, **29**, 72196-72246. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18643-y>
- [9] Chalaris, M., Gkika, D.A., Tolkou, A.K. and Kyzas, G.Z. (2023) Advancements and Sustainable Strategies for the Treatment and Management of Wastewaters from Metallurgical Industries: An Overview. *Environmental Science and Pollution Research*, **30**, 119627-119653. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30891-0>
- [10] Winkler, M.-K.H. and Van Loosdrecht, M.C.M. (2022) Intensifying Existing Urban Wastewater. *Science*, **375**, 377-378. <https://doi.org/10.1126/science.abm3900>
- [11] Jorge, A.M.S., Athira, K.K., Alves, M.B., *et al.* (2023) Textile Dyes Effluents: A Current Scenario and the Use of Aqueous Biphasic Systems for the Recovery of Dyes. *Journal of Water Process Engineering*, **55**, Article 104125. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104125>
- [12] Fei, Y. and Hu, Y.H. (2023) Recent Progress in Removal of Heavy Metals from Wastewater: A Comprehensive Review. *Chemosphere*, **335**, Article 139077. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139077>
- [13] Ghaffar, I., Hussain, A., Hasan, A., *et al.* (2023) Microalgal-Induced Remediation of Wastewaters Loaded with Organic and Inorganic Pollutants: An Overview. *Chemosphere*, **320**, Article 137921. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137921>
- [14] Almroth, B.C., Cartine, J., Jönander, C., *et al.* (2021) Assessing the Effects of Textile Leachates in Fish Using Multiple Testing Methods: From Gene Expression to Behavior. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **207**, Article 1111523. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111523>
- [15] Sudarshan, S., Hari Krishnan, S., Rathi Bhuvaneshwari, G., *et al.* (2023) Impact of Textile Dyes on Human Health and Bioremediation of Textile Industry Effluent Using Microorganisms: Current Status and Future Prospects. *Journal of Applied Microbiology*, **134**, Article 1xac064. <https://doi.org/10.1093/jambio/1xac064>
- [16] Shabir, M., Yasin, M., Hussain, M., *et al.* (2022) A Review on Recent Advances in the Treatment of Dye-Polluted Wastewater. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **112**, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.05.013>
- [17] Su, C.X.-H., Low, L.W., Teng, T.T., *et al.* (2016) Combination and Hybridisation of Treatments in Dye Wastewater Treatment: A Review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **4**, 3618-3631. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.07.026>
- [18] Islam, T., Repon, R., Islam, T., *et al.* (2022) Impact of Textile Dyes on Health and Ecosystem: A Review of Structure, Causes, and Potential Solutions. *Environmental Science and Pollution Research*, **30**, 9207-9242. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24398-3>
- [19] Farias, N.O.D., Albuquerque, A.F.D., dos Santos, A., *et al.* (2023) Is Natural Better? An Ecotoxicity Study of Anthraquinone Dyes. *Chemosphere*, **343**, Article 140174. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140174>
- [20] Keshava, C., Nicolai, S., Vulimiri, S.V., *et al.* (2023) Application of Systematic Evidence Mapping to Identify Available Data on the Potential Human Health Hazards of Selected Market-Relevant Azo Dyes. *Environment International*,

- 176, Article 107952. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107952>
- [21] 朱杰, 杨旭军, 陆永明. 含染料废水处理中微生物的应用[J]. 山西化工, 2023, 43(5): 228-229+236.
- [22] Zhang, B., Fan, J., Li, W., *et al.* (2023) Low Salinity Enhances Azo Dyes Degradation in Aerobic Granular Sludge Systems: Performance and Mechanism Analysis. *Bioresource Technology*, **372**, Article 128678. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128678>
- [23] Frijters, C.T.M.J., Vos, R.H., Scheffer, G., *et al.* (2006) Decolorizing and Detoxifying Textile Wastewater, Containing both Soluble and Insoluble Dyes, in a Full Scale Combined Anaerobic/Aerobic System. *Water Research*, **40**, 1249-1257. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.01.013>
- [24] Wang, Y.-Q., Ding, J., Pang, J.-W., *et al.* (2024) Promotion of Anaerobic Biodegradation of Azo Dye RR2 by Different Biowaste-Derived Biochars: Characteristics and Mechanism Study by Machine Learning. *Bioresource Technology*, **396**, Article 130383. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130383>
- [25] Artifon, W., Mazur, L.P., De Souza, A.A.U., *et al.* (2022) Production of Biofloculants from Spent Brewer's Yeast and Its Application in the Treatment of Effluents with Textile Dyes. *Journal of Water Process Engineering*, **49**, Article 102997. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102997>
- [26] Vinayagam, V., Palani, K.N., Ganesh, S., *et al.* (2024) Recent Developments on Advanced Oxidation Processes for Degradation of Pollutants from Wastewater with Focus on Antibiotics and Organic Dyes. *Environmental Research*, **240**, Article 117500. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117500>
- [27] Rodríguez-Narváez, O.M., Picos, A.R., Bravo-Yumi, N., *et al.* (2021) Electrochemical Oxidation Technology to Treat Textile Wastewaters. *Current Opinion in Electrochemistry*, **29**, Article 100806. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2021.100806>
- [28] Khan, M.D., Singh, A., Khan, M.Z., *et al.* (2023) Current Perspectives, Recent Advancements, and Efficiencies of Various Dye-Containing Wastewater Treatment Technologies. *Journal of Water Process Engineering*, **53**, Article 103579. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103579>
- [29] 崔玉民, 殷榕灿. 染料废水处理方法研究进展[J]. 科技导报, 2021, 39(18): 79-87.
- [30] Ariza-Pineda, F.J., Macías-Quiroga, I.F., Hinojosa-Zambrano, D.F., *et al.* (2023) Treatment of Textile Wastewater Using the Co(II)/NaHCO₃/H₂O₂ Oxidation System. *Heliyon*, **9**, E22444. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22444>
- [31] Patel, R.P., Pataniya, P.M., Siraj, S., *et al.* (2024) Simultaneous Production of Green Hydrogen and Decontamination of Dye Wastewater Using WSe₂-CuO/Graphite Electrochemical Cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, **55**, 815-827. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.246>
- [32] Wu, W., Qi, J., Fang, J., *et al.* (2022) One-Pot Preparation of Lignin-Based Cationic Flocculant and Its Application in Dye Wastewater. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **654**, Article 130082. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.130082>
- [33] Moradihamedani, P. (2021) Recent Advances in Dye Removal from Wastewater by Membrane Technology: A Review. *Polymer Bulletin*, **79**, 2603-2631. <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03603-2>
- [34] Nawaz, H., Umar, M., Nawaz, I., *et al.* (2021) Hybrid PVDF/PANI Membrane for Removal of Dyes from Textile Wastewater. *Advanced Engineering Materials*, **24**, Article 2100719. <https://doi.org/10.1002/adem.202100719>
- [35] Adesanmi, B.M., *et al.* (2022) Comparison of Dye Wastewater Treatment Methods: A Review. *GSC Advanced Research and Reviews*, **10**, 126-137. <https://doi.org/10.30574/gscarr.2022.10.2.0054>
- [36] Kumar, N., Pandey, A., Rosy, *et al.* (2023) A Review on Sustainable Mesoporous Activated Carbon as Adsorbent for Efficient Removal of Hazardous Dyes from Industrial Wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, **54**, Article 104054. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104054>
- [37] 刘源, 张娜, 刘群, 等. 阳离子染料废水处理技术研究进展[J]. 净水技术, 2023, 42(4): 39-51.
- [38] Cao, Y., Yang, L., Liu, F., *et al.* (2024) Adsorption Experiments and Mechanisms of Methylene Blue on Activated Carbon from Garden Waste via Deep Eutectic Solvents Coupling KOH Activation. *Biomass and Bioenergy*, **182**, Article 107074. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107074>
- [39] Barman, M.K., Bhattarai, A. and Saha, B. (2023) Applications of Ion Exchange Resins in Environmental Remediation. *Vietnam Journal of Chemistry*, **61**, 533-550. <https://doi.org/10.1002/vjch.202300027>
- [40] Wawrzekiewicz, M. and Kucharczyk, A. (2023) Adsorptive Removal of Direct Azo Dyes from Textile Wastewaters Using Weakly Basic Anion Exchange Resin. *International Journal of Molecular Sciences*, **24**, Article 4886. <https://doi.org/10.3390/ijms24054886>
- [41] Hassan, M.M. and Carr, C.M. (2018) A Critical Review on Recent Advancements of the Removal of Reactive Dyes from Dyehouse Effluent by Ion-Exchange Adsorbents. *Chemosphere*, **209**, 201-219. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.043>

- [42] Rao, W., Piliouras, P., Wang, X., *et al.* (2020) Zwitterionic Dye Rhodamine B (RhB) Uptake on Different Types of Clay Minerals. *Applied Clay Science*, **197**, Article 105790. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105790>
- [43] 李娟. 水凝胶吸附材料处理染料废水的研究进展[J]. 针织工业, 2022(9): 73-77.
- [44] Huang, Q., Zhou, Y., Fu, Z. and Zhu, J. (2023) Preparation of an Injectable Hydrogel Reinforced by Graphene Oxide and Its Application in Dye Wastewater Treatment. *Journal of Materials Science*, **58**, 3117-3133. <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08213-z>