

纺织印染排放尾水的去向及环境安全性探讨

丁丽^{1,2,3,4}, 张洁^{1,2,3,4*}, 李旭东^{1,2,3,4}, 负红娟^{2,3,4}

¹新疆环境保护科学研究院环境工程技术研究所 新疆乌鲁木齐

²新疆环境污染监控与风险预警重点实验室 新疆乌鲁木齐

³新疆清洁生产工程技术研究中心 新疆乌鲁木齐

⁴国家环境保护准噶尔荒漠绿洲交错区科学观测研究站 新疆乌鲁木齐

【摘要】我国纺织印染废水在工业废水中占比较大，因其具有耗水量和排水量大、水质复杂、污染物浓度高、色度高等水质特点，而成为工业废水中较难处理的废水之一。若未经有效处理直接排入水体或农田灌溉，会对水环境、农作物，甚至人类健康产生严重威胁。本文根据我国纺织印染废水现状，总结了目前纺织印染废水的处理方法、尾水的去向以及对环境的安全性，提出了纺织印染废水绿色、健康发展的建议，以期在纺织印染废水高效、可持续资源化利用方面提供科学依据。

【关键词】纺织印染废水；处理方法；尾水去向；环境安全性

【基金项目】新疆维吾尔自治区重点研发计划项目（2022B01045-1）：生态建设环境中用于纺织印染行业尾水关键技术研发

【收稿日期】2024 年 8 月 10 日

【出刊日期】2024 年 9 月 20 日

【DOI】10.12208/j.aes.20240017

Discussion on the destination and environmental safety of textile printing and dyeing effluent

Li Ding^{1,2,3,4}, Jie Zhang^{1,2,3,4*}, Xudong Li^{1,2,3,4}, Hongjuan Yun^{2,3,4}

¹Institute of Environmental Engineering Technology, Xinjiang Academy of Environmental Protection Science, Urumqi, Xinjiang

²Xinjiang Key Laboratory for Environmental Pollution Monitoring and Risk Warning, Urumqi, Xinjiang

³Xinjiang Engineering Technology Research Center for Cleaner Production, Urumqi, Xinjiang

⁴National Environmental protection Junggar desert oasis ecotone scientific observation and research station, Urumqi, Xinjiang

【Abstract】Textile printing and dyeing wastewater accounts for a large proportion of industrial wastewater in China. Because of its large water consumption and displacement, complex water quality, high concentration of pollutants and high chrominance water quality characteristics, it has become one of the more difficult to treat industrial wastewater. If it is discharged directly into water or farmland without effective treatment, it will pose a serious threat to water environment, crops, and even human health. According to the present situation of textile printing and dyeing wastewater in China, this paper summarizes the current treatment methods of textile printing and dyeing wastewater, the direction of tail water and the safety of the environment, and puts forward suggestions for the green and healthy development of textile printing and dyeing wastewater, in order to provide scientific basis for the efficient and sustainable resource utilization of textile printing and dyeing wastewater.

【Keywords】Textile printing and dyeing wastewater; Treatment method; Where the tail water goes; Environmental safety

第一作者简介：丁丽（1990-），新疆环境保护科学研究院，硕士，高级工程师，E-mail: dingli010800@163.com;

*通讯作者：张洁（1987-），新疆乌鲁木齐市，E-mail: 415691369@qq.com

我国作为最早有纺织品和发展染色工艺的国家之一,在纺织品和染色工艺方面拥有悠久的历史和丰富的文化底蕴,更成为了现代经济不可或缺的一部分。随着工业化快速发展,纺织产业逐渐从手工生产转变为机械化、自动化生产,在生产效率大幅提高的同时,产品种类也日益丰富,在我国国民经济中确实扮演了传统支柱型产业和重要的民生产业的角色,在国际竞争中也具有明显优势。由于染色工艺需要活性染料,而活性染料利用率低、耗水和耗盐类化合物用量高,因此,产生了大量含有高盐、高有机物的染色废水。据统计,纺织印染废水每年排放量大约为 20-23 亿吨,排放量占全国废水排放的 11%,占比较大,这反映了纺织印染行业在废水排放方面的显著影响,也凸显了该行业在环保方面面临的挑战。据报道,我国印染行业单位用水量是国外的 3-4 倍,而纺织印染废水中污染物平均含量却高达国外的 2-3 倍。废水排放量大、污染物浓度高、水质变化大、难处理等成为了我国印染废水的主要特征^[1-3],同时也给绿色低碳循环高品质发展的纺织业展带来了难题。

近年来,我国的环保政策逐渐趋严,尤其是对一些高污染、高耗能的企业,其中纺织印染行业就面临着较大的挑战与压力,低成本且高效安全的处理纺织印染废水成为了行业难点,也备受学者关注。如何既能做到最大程度节水、实现水资源高效利用,又能对生态环境影响最小,这个问题有待深入研究。笔者根据我国纺织印染废水的现状,综述了目前国内外纺织印染废水处理方式及其对环境的安全性,提出建议,为我国纺织印染废水高效且可持续资源化利用提供科学依据。

1 我国纺织印染废水现状

纺织印染企业在对原料进行生产、加工,制成纺织印染产品的过程中产生和排放的所有废水称为纺织印染废水。纺织印染废水,尤其是印染废水,是我国工业废水中较难处理的一种,据统计,印染加工 1 吨纺织品,耗水量约为 100-200 吨,其中有 80% 左右变成废水。纺织印染废水中主要含有纺织纤维上的污物、油脂以及各种染料、染剂等,这些污染物使得纺织印染废水具有水量大、水质复杂、污染物浓度高、色度深、含有毒物质等特征。若未经有效处理直接排入水体或用于农田灌溉,则会破坏水体生

态平衡^[4],影响水中各种生物的正常生长;对农作物的产量也会产生无法预估的影响,从而对人类健康造成威胁^[5]。

根据中国环境统计数据显示,在我国高耗能行业企业中,纺织业是耗水量和排水量的大户,其废水排放量位居前列,其中印染行业在纺织废水排放中贡献率达到 70% 以上^[6]。据新闻报道,从 20 世纪 90 年代中期开始,我国纺织行业废水排放量均在 11 亿吨/年以上,年排放量位居全国工业行业前十名。2008 年我国纺织工业废水排放量为 23 亿吨,在全国工业废水排放总量中占比 10.6%,在全国工业行业中排名第三。2021 年我国纺织印染废水排放量达 20 亿吨。2022 年我国纺织印染废水排放量为 20-23 亿吨,占全国废水排放量 11%。2023 年我国纺织印染废水排放量为 14.13 亿吨,在全国工业废水排放总量中占比 7.5%,在全国工业行业废水排放量中位列第五。由此可见,纺织印染废水的排放量在我国工业废水排放量中占比不轻,其对我国水环境的影响不容小觑。

2 纺织印染废水处理方式

国外纺织印染废水处理方式主要是根据地理位置、行业分布、技术条件、环境法规以及经济考量等因素分为集中处理和分散处理两大类。意大利、日本和德国在印染废水处理方面采取了不同的策略。意大利和日本等国家的纺织印染行业较为发达,印染企业分布相对集中,因此产生的印染废水较多。这些国家主要以工厂处理和城市污水综合处理相结合的方法为主来处理印染废水,这种处理方式有助于后续处理,并可降低整体处理成本。德国的印染行业分布相对分散,以单工厂处理模式为主,这种模式的优点在于能够针对每个工厂的具体情况制定个性化的处理方案,确保废水处理效果达到最佳。同时,单工厂处理也有利于实现废水的“零排放”或“低排放”,满足更为严格的环保要求。在德国,一些先进的印染企业已经能够实现废水的深度处理和回用。相关技术的研究包括清洁生产原料回收技术和印染尾水处理回用技术等。清洁生产原料回收技术以生产过程中废水分质回用为主,水解染料等资源回收仅见文献报道^[7-8]。

国内在处理传统印染废水时,广泛采用了吸附法、生物法和高级氧化法等多种技术手段。这些方

法各有特点(见表1), 适合不同性质的印染废水处理需求。吸附法因其操作简便、处理效率高、来源广、价格低廉而被广泛应用。其基本原理是利用吸附材料表面丰富的孔隙结构和特定的化学性质, 通过物理吸附(如范德华力)、化学吸附(如化学键合)或生物吸附(如微生物细胞壁对污染物的吸附)等方式, 将废水中的有机污染物(如染料分子、COD等)和悬浮物固定在吸附剂表面, 从而实现净化水质的目的。常用的吸附材料有活性炭、硅藻土、膨润土、离子交换树脂等, 这些材料因其独特的物理、化学性质, 在降低废水中的COD和色度方面表现出色。吸附法在城镇生活污水、工业废水等的处理中应用较多且具有较好的处理效果^[9]。但吸附剂存在难以循环利用、再生成本较高、存在二次污染问题的缺点, 因此需开发新型活性炭, 在经济适用的基础上又能显著提高重复利用率, 是环保和资源再利用领域的重要研究课题。生物法作为一种污水处理技术, 包括多种工艺, 其中曝气生物滤池和膜生物反应器是两种最具代表性的。曝气生物滤池包含了物化、生化等过程, 主要是去除废水中COD^[10]。曝气生物滤池常用于微污染的污水治理, 主要是通过填料上附着的微生物进行新陈代谢作用, 即生物降解过程, 来去除污水中的COD。以其反应器占地面积小和投资成本低的优势, 在污水处理领域应用广泛。色度通常是由废水中存在的难降解有机染料或其他有色物质引起的, 这些物质往往难以通过单一的生物处理过程完全去除, 因此, 在实际应用中, 为了达到较好的色度去除效果, 曝气生物滤池通常需要与其他处理工艺联用, 如混凝沉淀、吸附、高级氧化等工艺。此外, 曝气生物滤池通过其内部的生物膜系统, 还能够一定程度上去除氨氮^[11], 并有可能通过优化操作条件或与其他工艺联用实现氮和磷的进一步去除^[12-14]。这使得曝气生物滤池成为一种功能多样、适应性强的污水处理技术。但曝气生物滤池也存在不可忽视的缺点: 一是对进水悬浮物(SS)的要求较为严格, 一般要求 $SS \leq 100\text{mg/L}$, 最好 $SS \leq 60\text{mg/L}$; 二是反冲洗过程中滤池需要承受较大的水力负荷^[15], 这可能导致滤料层的松动和磨损, 影响滤池的稳定性和使用寿命, 此外反冲洗还会消耗大量的水资源和能源, 增加运行成本。MBR是膜技术与生物处理技术的有机结合^[16], 通过膜组

件的分离作用, 将生化反应池中的活性污泥和大分子有机物质有效截留, 使这些物质在反应器中不断反应、降解。这一过程不仅提高了生物反应器的处理效率, 还实现了固液的高效分离。但缺点为膜污染较重、投资成本高、耗水量大等。高级氧化法是一种通过外界的能量和物质的持续输出, 产生氧化性很强的羟基自由基($\cdot\text{OH}$), 进而去除污水中污染物的技术。该技术主要有芬顿氧化法、光催化氧化法、臭氧催化氧化法和电催化氧化法。芬顿氧化法主要是通过 Fe^{2+} 与 H_2O_2 反应生成的羟基自由基($\cdot\text{OH}$)与废水中的有机污染物反应, 可降解废水中多种有机污染物^[17], 该法对反应条件的要求不高, 但运行成本过高、反应时间长。光催化氧化技术是一种利用光催化剂在光照条件下进行电子跃迁, 进而产生一系列强氧化性物质(如羟基自由基、超氧自由基以及空穴等)来氧化还原降解废水中有机污染物的技术^[18-19]。该法因其反应条件温和而备受关注, 这使得它适用于处理大多数种类的有机废水, 在常温常压下, 该技术就能够有效地进行, 不需要额外的加热或高压设备, 从而降低了能耗和运行成本。但主要缺点是催化剂的成本较高, 这直接导致了整体运行费用的昂贵, 催化剂的制备、回收和再利用都涉及到复杂的工艺和较高的成本。臭氧氧化法是臭氧直接与废水中的有机物发生反应, 通过电子转移、亲电加成或环加成等机制, 攻击并破坏有机物的不饱和键和官能团, 从而实现有机物的降解。此外, 臭氧在水中还能分解产生羟基自由基($\cdot\text{OH}$), 这是一种非常活泼的氧化剂, 其氧化电位极高, 几乎可以无选择性地与废水中的大多数有机物发生快速反应, 进一步促进有机物的降解, 还能起到脱色作用^[20]。陈广华等^[21]将生化二级出水通过臭氧氧化深度处理, 结果显示: 臭氧氧化法在废水处理中确实表现出色度去除效果显著的优点, 但对COD的去除效果却表现出一定的不稳定性。但在实际应用中存在臭氧与羟基生成 $\cdot\text{OH}$ 的反应速率相对较低的问题, 这可能会影响到处理效率, 难以满足大规模废水处理的需求。并且该工艺的运行维护成本也较高, 对废水水质的要求也相对严格。电解催化氧化技术是一种在常温常压条件下, 通过电化学反应去除废水中有机污染物^[22], 其核心在于阳极放电过程中产生的羟基自由基($\cdot\text{OH}$), 这些强氧化性的自

由基能够无选择性地与废水中的有机物发生反应, 从而实现污染物的降解和去除。该法操作简单、处理效率高、成本低(在设备投资和维护方面相对于其他高级氧化技术可能较低, 但并非绝对)、占地面积

小, 但在运行过程中需要持续的电能供应以维持电解除反应, 这是其运行成本中的一个重要组成部分, 特别是在处理大规模废水或高浓度有机废水时, 电能消耗可能会显著增加, 从而导致运行成本上升。

表 1 国内印染废水常用的处理方式对比情况

处理方式	优点	缺点
吸附法	操作简便、处理效率高、来源广、价格低廉。	难以循环利用、再生成本较高、存在二次污染问题。
生物法	曝气生物滤池: 反应器占地面积小、投资成本低, 可与其他工艺连用, 是一种功能多样、适应性强的污水处理技术。 膜生物反应器: 处理效率高。	曝气生物滤池: 对进水悬浮物(SS)的要求较严格, 且反冲洗会影响滤池的稳定性和使用寿命, 并增加运行成本。 膜生物反应器: 膜污染较重、投资成本高、耗水量大。
高级氧化法	芬顿氧化法: 可降解废水中多种有机污染物, 对反应条件的要求不高。 光催化氧化法: 反应条件温和, 适用于处理大多数种类的有机废水, 能耗较低。 臭氧氧化法: 可以无选择性地与废水中的大多数有机物发生快速反应降解有机物, 色度去除效果显著。 电催化氧化法: 操作简单、处理效率高、成本低、占地面积小。	芬顿氧化法: 运行成本过高、反应时间长。 光催化氧化法: 催化剂的成本较高。 臭氧氧化法: COD 的去除效果不稳定, 处理效率不高, 难以满足大规模废水处理的需求, 运行维护成本也较高, 对废水水质的要求也相对严格。 电催化氧化法: 电能消耗大、运行成本高。

目前, 我国对印染污水回用的研究已经取得了显著的进展, 从现有研究及实际应用总结出如下特点: ①当前大多数回用技术仍处于实验室研究和小规模中试阶段, 与实际工程环境存在差异, 实际应用不多; 且现有技术水的回用率普遍较低, 一般不超过 50%, 回用水主要被用于前道工序(对水质要求不高的), 这限制了回用水的价值最大化; 当前在提升回用水水质和回用率方面, 缺乏能够显著提高效率的高效技术, 这导致现有技术的推广应用受到限制。②回用处理(也称为深度处理或再生水处理)主要是针对已经经过初步处理达到排放标准(如国家污水排放标准)的印染污水, 进行进一步的净化和处理, 以提升其水质至能够满足特定回用要求(如工业冷却水、冲洗水、农业灌溉水等)的标准。在处理印染污水以实现回用的过程中, 主要采用混凝、吸附、过滤和氧化等工艺, 这些技术在去除污水中的悬浮物、有机物、色度等方面发挥了重要作用, 但对于去除盐度和硬度的关键技术研究微乎其微。③由于现有技术水平有限, 印染污水大量回用会对生产及污水处理系统带来一系列问题, 主要包括有机

污染物和无机盐的积累。目前关于污水长期回用的水质问题及其对水处理系统的影响研究相对较少, 尤其是无机盐积累问题的研究更为匮乏。除了回用于生产过程中, 部分达标水质可用于厂区道路清扫、消防用水、冲厕等, 也可库塘暂存后补充经济作物和生态林用水、人工生态湿地处理后作为景观用水等^[23], 但后者是否对经济作物、生态林的生长存在潜在危害, 尤其是长远来看, 其对生态环境的影响研究较少, 还需进一步开展相关研究。

3 排放废水环境安全性

为满足纺织印染产品的现代化, 纺织印染工艺不断更新发展, 纺织印染过程中添加的助剂、染料等化学物质也多元化, 这些物质在废水中残留并相互作用, 导致了废水成分的复杂化。废水中游离甲醛、氯漂白剂、表面活性剂、重金属、消毒剂等这些成分因其强烈的生态毒性, 一旦排入水环境中, 将对生态系统和人类健康的安全产生重大威胁^[24]。由于纺织印染废水中存在多种有毒有害物质, 这些物质使得纺织印染废水总体呈现出多重生物毒性, 这种毒性可以在生物体的个体、组织、细胞和分子水

平上引发各种不良反应^[25-26]。不同类型的纺织品,其产生的印染废水毒性也不同^[27],如化纤印染废水的毒性远高于棉纺印染废水^[28]。不同生产工艺段会添加不同的化学物质,以满足特定的工艺需求,由此产生的印染废水毒性也会存在显著差异。在纺织染料中偶氮、蒽醌、酞箐类为最重要的染料,其具有生物毒性。R. Croce 等^[29]对 42 种染料进行了藻类 72 小时短期毒性和大型溞 48 小时急性毒性试验,以 LC_{50}/EC_{50} 值小于 100 mg/L 判定为有毒性,研究结果表明 42 种染料中有 30 种对藻类有毒、9 种对大型溞有毒、4 种对两者均有较高毒性。A. Tkaczyk 等^[30]对近年来有关染料的毒性数据进行了综述,结果显示,在不同水生生物的毒性试验中,各类染料的 LC_{50} (半数致死浓度) 和 EC_{50} (半数效应浓度) 值确实存在较大的范围差异, LC_{50}/EC_{50} 值为 0.02-7 270.3 mg/L,虽然大部分偶氮和蒽醌染料的 LC_{50}/EC_{50} 处于 10-100mg/L,被归为较低的 III 级毒性,但纺织印染废水中染料的高浓度往往会对废水的综合毒性产生显著的补偿效应,这意味着,尽管单个染料的毒性可能相对较低,但由于废水中染料的浓度非常高,它们对废水整体毒性的贡献仍然不可忽视^[5]。在某些生产工艺段中会添加不同种类的重金属,如铜、锌、镍、铬、镉、铅等,据大量研究报道,这些重金属具有生物毒性^[31-36],进入废水后在种类和数量上对废水的影响不可小觑^[37]。赵霞等^[38]对某地 8 家企业印染废水中的镉含量进行了调研,发现有 6 家废水中的镉质量浓度为 0.11-0.45mg/L,高于《纺织染整工业水污染物排放标准》(GB 4287-2012)^[39]中总镉 0.1mg/L 的控制要求,镉及其化合物具有慢性毒性及潜在致癌风险,对人体健康和环境都具有潜在的危害,已在欧盟和美国环保署的优先防治污染物名单中。在纺织印染助剂中,非离子表面活性剂常作为匀染剂、乳化剂、分散剂应用广泛^[40-41]。壬基酚聚氧乙烯醚是其中一种重要的非离子表面活性剂,其本身毒性较小,但经微生物降解后会产生更高毒性的产物,不仅对植物、动物产生毒性,还具有明显的雌激素活性^[38]。Xiwei He 等^[42]对 10 家纺织印染企业废水进行调研后发现经生化处理后废水中雌激素活性具有明显升高的趋势,说明废水中壬基酚聚氧乙烯醚的生物降解与废水中雌激素活性显著升高存在一定的关联性,这主要是由于壬基酚聚

氧乙烯醚在降解过程中会产生壬基酚 (NP) 等具有雌激素活性的降解产物,虽然其质量浓度仅有 $\mu\text{g/L}$ 级别,但其对废水雌激素活性的平均贡献率可达 70%,这反映了 NP 在废水处理过程中的重要性和其潜在的生态风险。印染过程中添加的漂白剂也具有一定毒性。A. Villegas-Navarro 等^[43]发现纺织印染废水中的 ClO^- 能够对大型溞产生较明显的急性毒性, LC_{50} 为 0.02 mg/L,但由于 ClO^- 具有挥发性,且暴露于阳光时的半衰期比较短,因此对废水的毒性一般仅存在于在废水产生的早期。李磊等^[44]对印染排放尾水对不同海洋生物(甲壳类、鱼类、贝类、螺类)幼体的毒性进行了研究,结果表明,经过处理后的印染排放尾水中 pH 正常,氨氮、亚硝酸盐仅微量并且符合两种排放标准,苯胺的含量虽然超过了《纺织染整工业水污染物排放标准》,但符合《污水综合排放标准》^[45],其余水质指标均符合两类排放标准,尾水对 6 种受试海洋生物产生不同程度的毒性,毒性单位平均值为 4.16,属中毒水平,潜在生态毒性值为 4.72,属高毒水平。由此可见,纺织印染尾水虽然可满足污水综合排放标准,但对生态环境的安全性仍然存在威胁,其毒性不可低估。

4 结论与建议

综上所述,我国纺织印染行业耗水量和排水量大,废水水质复杂、污染物种类繁多、处理难度大,这不仅对企业造成了水资源浪费和成本增加,也是对社会环境和生态,乃至人类健康构成了威胁。为了解决这一问题,建议采取以下措施:

(1) 减少源头污染。从源头入手,采用环保型染料和助剂,选择生物基材料,如生物基着色剂、生物基表面活性剂、生物基整理剂、纺织印染用酶助剂等,从源头上减少废水中的有害物质的浓度及含量。这不仅可以降低后续废水处理的难度,还能减少对环境的污染。

(2) 加强技术创新。鼓励和支持企业研发新技术、新工艺和新设备,提高废水处理效率和处理质量。优化生产工艺,减少废水产生量,例如采用连续化、自动化生产方式,提高生产效率和原料利用率,减少废水和废渣的排放。

(3) 加强尾水毒性研究。目前有关印染排放尾水毒性的研究深度不足、研究方法单一、数据积累不足,需加强尾水毒性研究。建立长期跟踪研究机

制、推广生物毒性检测技术、加强跨学科合作以及完善相关标准和政策等, 更深的研究尾水的生物毒性及其影响机制, 为废水处理技术的优化和升级提供科学依据。

(4) 推广节水技术。在纺织印染企业推广节水技术和设备, 最大程度的减少生产过程中的水资源消耗和浪费。加强企业节水意识, 及时更换节水零部件。

(5) 加强环保监督。建立健全监管体系, 加大加强监管力度, 定期检查和不定期抽查, 强化在线监测, 确保企业废水处理设施的正常运行和废水的达标排放。杜绝弄虚作假, 严厉查处违法行为, 加强信息公开和公众参与。

(6) 提高公众意识。加强环保宣传教育, 创新宣传形式, 拓宽传播渠道及路径, 提高公众对印染废水污染问题的认识和重视程度, 并建议反馈机制, 及时收集公众对宣传活动的意见和建议, 形成全社会共同关注环保的良好氛围。

致谢

在论文写作过程中, 我参阅了大量有价值的文献资料, 在此向这些专家、学者表示感谢! 他们在此领域的研究成果给予我很多启发, 增加了我的学识。其次, 我还要感谢给予我帮助的领导和同事, 他们的意见及建议使我受益匪浅。最后, 更要提前向评审我论文的评审老师们表示感谢! 由于本人时间、精力、能力有限, 对本文涉及的领域还留下了很多遗憾, 您的批评和建议将会是我继续进步的动力!

参考文献

- [1] 史会剑, 朱大伟, 胡欣欣, 等. 印染废水处理技术研究进展探析[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(2): 74-80.
- [2] 杨少红. 印染行业废水特征及处理工艺应用探讨[J]. 环境影响评价, 2016, 38(1): 69-71.
- [3] 潘铁山, 徐静, 接晓婷. 组合工艺处理不同浓度印染废水的研究进展[J]. 江西化工, 2018, (5): 9-13.
- [4] KATHERESAN V, KANSEDO J, LAU S Y. Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2018, 6(4): 4676-97.
- [5] 姜金宏, 何席伟, 熊晓敏, 等. 纺织印染废水毒性特征与控制技术研究进展[J]. 工业水处理, 2021, 6(41): 77-87.
- [6] 薛罡. 印染废水治理技术进展[J]. 工业水处理, 2021,

41(9): 10-17.

- [7] A. Sonune and R. Ghate, "Developments in wastewater treatment methods," Desalination, vol. 167, pp. 55-63, 2004.
- [8] T. Robinson, B. Chandran, and P. Nigam, "Studies on desorption of individual textile dyes and a synthetic dye effluent from dye-adsorbed agricultural residues using solvents," Bioresource technology, vol. 84, no. 3, pp. 299-301, September 2002.
- [9] 张颖, 李光明, 陈玲, 等. 活性炭再生技术的发展[J]. 化学世界, 2001(8): 441-444.
- [10] 邱立平, 陈京英, 刘永正, 等. 曝气生物滤池处理机理及反冲洗控制研究进展[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2010, 24(2): 216-220.
- [11] 代学民, 李亚楠, 任淑萍. 曝气生物滤池深度处理印染废水技术研究现状及发展趋势[J]. 染整技术, 2017, 39(7): 53-56.
- [12] 赵耀阳, 王语嫣, 陈红兵, 等. 曝气生物滤池影响因素及脱氮除磷研究进展[J]. 广东化工, 2024, 51(18): 132-134.
- [13] 唐国民, 李良玉, 宋晶晶, 等. 过氧化氢/臭氧-曝气生物滤池深度处理造纸废水生化出水[J]. 中国造纸, 2023, 42(11): 91-95.
- [14] 凌晨, 宁洪良, 赵立新, 等. 串联曝气生物滤柱对麦芽酚废水深度净化研究[J]. 天津理工大学学报, 2023, 39(05): 15-20.
- [15] 杨明, 刘琪, 孙健, 等. 印染废水深度处理研究及应用进展[J]. 净水技术, 2020, 39(10): 109-115.
- [16] 麦建波, 江栋, 范远红, 等. 我国环保新常态下的印染废水提标改造现状与趋势[J]. 染整技术, 2016, 38(2): 58-61.
- [17] 罗丹, 郭丽潇, 郝全爱, 等. 芬顿氧化法处理氧化性泡沫去污废液中的有机物[J]. 核化学与放射化学, 2024, 46(02): 170-176.
- [18] 宋继梅. 光催化降解处理印染废水研究进展[J]. 印染助剂, 2018, 35(9): 5-9.
- [19] 杨烨鹏, 李懿舟, 王家强, 等. 光催化技术在处理废水中的规模化应用[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2019, 41(3): 565-571.
- [20] 景新军, 蔡大牛, 李斌等. 印染废水深度处理技术进展[J]. 水处理技术, 2022, 6(48): 13-19.
- [21] 陈广华. 臭氧深度处理印染废水工程实例[J]. 染整技术, 2019, 041(003): 59-61.
- [22] 杨尚源, 林靖华, 黄燕, 等. 电解催化氧化法废水处理机制研究[J]. 环境工程学报, 2017, 11(1): 237-243.

- [23] 新疆纺织印染工业废水排放与综合利用模式探讨[J]. 新疆环境保护, 2020, 42(3): 40-45.
- [24] Balapure K, Jain K, Bhatt N, et al. Exploring bioremediation strategies to enhance the mineralization of textile industrial wastewater through sequential anaerobic-microaerophilic process[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2016, 106: 97-105.
- [25] Sponza D T. Necessity of toxicity assessment in Turkish industrial discharges (Examples from metal and textile industry effluents) [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2002, 73(1): 41-66.
- [26] Akhtar M F, Ashraf M, Javeed A, et al. Toxicity appraisal of untreated dyeing industry wastewater based on chemical characterization and short term bioassays[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2016, 96(4): 502-507.
- [27] Balapure K, Jain K, Bhatt N, et al. Exploring bioremediation strategies to enhance the mineralization of textile industrial wastewater through sequential anaerobic-microaerophilic process[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2016, 106: 97-105.
- [28] Liang Jieying, Ning Xunan, Sun Jian, et al. Toxicity evaluation of textile dyeing effluent and its possible relationship with chemical oxygen demand[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 166: 56-62.
- [29] Croce R, Cina F, Lombardo A, et al. Aquatic toxicity of several textile dye formulations: Acute and chronic assays with *Daphnia magna* and *Raphidocelis subcapitata*[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 144: 79-87.
- [30] Tkaczyk A, Mitrowska K, Posyniak A. Synthetic organic dyes as contaminants of the aquatic environment and their implications for ecosystems: A review[J]. Science of the Total Environment, 2020, 717:19.
- [31] Tara N, Iqbal M, Khan Q M, et al. Bioaugmentation of floating treatment wetlands for the remediation of textile effluent[J]. Water Environment Journal, 2019, 33(1): 124-134.
- [32] Sreedharan V, Krithishna K V, Nidheesh P V. Removal of chromium and iron from real textile wastewater by sorption on soils[J]. Journal of Hazardous Toxic and Radioactive Waste, 2017, 21(4): 6017002.
- [33] Ghorbani M, Eisazadeh H. Removal of COD, color, anions and heavy metals from cotton textile wastewater by using polyaniline and polypyrrole nanocomposites coated on rice husk ash [J]. Composites Part B-Engineering, 2013, 45(1):1-7.
- [34] Mubashar M, Naveed M, Mustafa A, et al. Experimental investigation of *Chlorella vulgaris* and *Enterobacter* sp. MN17 for decolorization and removal of heavy metals from textile wastewater[J]. Water, 2020, 12(11):2-5.
- [35] Abu-Ghunmi L N, Jamrah A I. Biological treatment of textile wastewater using sequencing batch reactor technology[J]. Environmental Modeling & Assessment, 2006, 11(4): 333-343.
- [36] Prabha S, Ramanathan A L, Gogoi A, et al. Suitability of conventional and membrane bioreactor system in textile mill effluent treatment[J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 56(1): 14-23.
- [37] 李琦. 水体中重金属(Cu²⁺、Cr⁶⁺和 Cd²⁺)联合对斑马鱼成鱼的生物毒性效应[D]. 山东: 山东农业大学, 2023.
- [38] 赵霞, 罗培松, 相巧明. 绍兴市典型印染废水中重金属镍排放现状及排放源调查[J]. 中国环境监测, 2016, (14): 91-97.
- [39] 国家环境保护部. 纺织染整工业水污染物排放标准, GB4287-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [40] 杨永利. 浅谈纺织印染助剂中的非离子表面活性剂的生产工艺[J]. 中国科技博览, 2016(2): 73-73.
- [41] 徐世美, 张淑芬, 杨锦宗. 表面活性剂在纺织染整中的应用[J]. 日用化学品科学, 2002(6): 18-23.
- [42] He Xiwei, Qi Zhaodong, Gao Jie, et al. Nonylphenol ethoxylates biodegradation increases estrogenicity of textile wastewater in biological treatment systems[J]. Water Research, 2020, 184: 116137.
- [43] Villegas-Navarro A, Gonzalez M C R, Lopez E R. Evaluation of *Daphnia magna* as an indicator of toxicity and treatment efficacy of textile wastewaters[J]. Environment International, 1999, 25(5): 619-624.
- [44] 李磊, 蒋玫, 沈新强, 等. 印染排放尾水对几种海洋生物幼体的毒性研究[J]. 上海海洋大学学报, 2015(24): 712-718.
- [45] 国家环境保护局. 污水综合排放标准, GB 8978-1996[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.

版权声明: ©2024 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS