arXiv.org 电子预印本档案

等离子体活化水（PAW）用于降解稀释工业废水中的有机污染物

Punit Kumar[a] 和 Priti Saxena[ba]勒克瑙大学物理系，印度勒克瑙 226007[b]D.A.V. 学位学院动物学系，印度勒克瑙 226004

摘要——**等离子体活化水（PAW）为降解工业废水中的持久性有机污染物提供了一种可持续的非热解决方案。本研究采用滑动弧等离子体系统制备等离子体活化水，用于处理含有染料、农药和药物的稀释废水。研究改变了暴露时间、稀释比和污染物浓度等实验参数，并采用紫外-可见光谱法、高效液相色谱、总有机碳和化学需氧量进行分析。结果表明，在羟基自由基和硝酸盐/亚硝酸盐自由基驱动的拟一级动力学过程中，染料、农药和药物的降解效率分别高达90%、85%和80%。研究结果表明，等离子体活化水有望成为一种绿色、可扩展的废水处理策略，能够减少化学品使用、支持水回用并提升环境安全；未来还可拓展至中试规模应用。**

索引词—**等离子体活化水、工业废水、活性氧和氮物种（RONS）、环境修复、染料降解、农药降解、药物污染物。**

一、引言

纺织、药物、农用化学品和农药行业的工业生产会产生废水，其中含有染料、农药残留、药物和痕量重金属等复杂混合物。这些污染物

通常具有较高的稳定性、毒性和难降解性，对水生生态系统和人类健康构成严重威胁。传统处理技术已得到广泛应用，例如化学氧化（如芬顿法、臭氧化）、生物处理系统（活性污泥、生物膜）和吸附（活性炭、沸石）。然而，这些技术存在根本性缺陷：残留化学试剂可能造成二次污染；生物处理系统通常难以有效处理不可生物降解的化合物；吸附则只是将污染物从水转移至固相，仍需进一步处置。此外，在处理大体积废水或低浓度污染物时，这些方法可能能耗高、成本大（Maybin 等，2024）。鉴于这些局限，人们对更绿色、可持续且有效的水修复技术的需求日益增长，这类技术应尽量减少化学药剂的添加和二次废物的产生。

一种颇具前景的方法是使用等离子体活化水（PAW）。这是一种非热等离子体处理方式，通过直接或间接地使水暴露于等离子体中来生成活性物种。在PAW中，暴露于非平衡（冷）大气压等离子体会诱导生成羟基自由基（•OH）、臭氧（O3）、过氧化氢（H2O2）、硝酸盐（NO_3^-）、亚硝酸盐（NO_2^-）、过氧亚硝酸盐（$ONOO^-$）等活性氧和氮物种（RONS）（Hadinoto et al., 2023；Xiang et al., 2022）。这些活性物种之间的协同作用赋予PAW强大的氧化潜力。将此类水用于含污染物的废水时，RONS可通过自由基和非自由基途径攻击有机分子，破坏染料中的发色团、断裂农药中的化学键，并氧化药物基团，使其矿化或转化为危害较小的中间产物（Lu et al., 2025；Maybin et al., 2024）。重要的是，PAW通常在环境温度和大气压下运行，无需添加化学氧化剂，从而降低试剂成本和二次污染风险（Hadinoto et al., 2023）。

此外，等离子体活化水的优势还包括可与传统处理方法（如生物处理或吸附步骤）结合，以实现更高的去除率；还可通过调节等离子体功率、气体组成、暴露时间或流体动力学条件（如鼓泡）来精细调控活性氧氮物种的组成。例如，引入空气鼓泡可增强等离子体生成物种向水中的传质，从而提高二氧化氮、硝酸根、臭氧和过氧化氢的浓度（Rathore 等人，2023）。尽管等离子体活化水在微生物灭活和农业领域的应用日益广泛（Srivastava 等人，2025；Rahman 等人，2022），但其在复杂工业废水处理中的应用仍缺乏充分研究。

事实上，现有研究大多针对简化体系，例如单一染料、分离的农药化合物或缓冲溶液，而非含有多种污染物的真实废水。多种有机物共存、离子强度、缓冲能力以及基质干扰都可能显著影响活性氧氮物种的反应性和稳定性（Nowruzi 等人，2024）。因此，针对含有染料、农药和药物的稀释工业废水开展等离子体活化水应用的系统研究，正当其时且至关重要。这类研究有助于阐明降解动力学、反应机制路径、活性氧氮物种与污染物分子之间的相互作用，以及真实废水基质带来的局限或协同效应。

因此，本研究旨在填补这一空白。研究目标有三项：（1）评估等离子体活化水对稀释工业废水中代表性染料、农药残留和药物化合物的降解效率；（2）探究各活性氧氮物种在污染物分解中的作用（例如通过清除剂实验或选择性检测）；（3）评估等离子体活化水辅助

处理作为工业废水环境友好型修复策略的可行性。我们预计，这种整体性方法不仅能够验证等离子体活化水的实际应用潜力，还有助于指导其规模化，并将其整合到现有废水处理体系中。

在以下各节中，我们将介绍实验装置和等离子体活化水表征（第2节）、染料、农药和药物类别的降解结果及动力学（第3节），随后阐释机理见解以及潜在的局限性和应用（第4节）。最后，我们将讨论规模化考量和未来研究方向。

II. 材料与方法

工业废水采集

从纺织厂、农药厂和制药厂，以提供用于评估的真实复杂基质。废水样品在4°C下储存，使用前进行过滤（0.45 μm）以去除悬浮固体。选取以下化合物作为模型污染物：染料（亚甲基蓝、罗丹明B）、农药（莠去津、毒死蜱）和药物（布洛芬、对乙酰氨基酚）。使用去离子水配制储备液（1,000 mg/L），并按需稀释；定量分析所用校准标准品均为分析纯。所有溶剂、试剂和支持电解质（如高效液相色谱流动相）均为高效液相色谱级或分析纯，所有溶液均使用超纯去离子水配制。

等离子体活化水（PAW）采用在环境空气下运行的滑动弧放电系统制备。等离子体反应器由两根相互分开的铜电极构成，电极间施加8–10 kV电压，产生100–200 mA的电流。电弧沿水面或略高于水面的气液界面滑动，以促进活性物种向液相转移。处理时间为5至60 min，等离子体羽流直接作用于水面上方。（滑动弧制备PAW的装置示意图见图1）。每个活化周期结束后，收集生成的PAW，并立即测定其关键物理化学参数：pH值（使用校准后的pH电极测量）、氧化还原电位（ORP，使用铂氧化还原电极测量）、过氧化氢（H2O2）浓度（采用硫酸氧钛比色法测定），以及硝酸盐（NO_3^-）和亚硝酸盐（NO_2^-）浓度（采用离子色谱法或格里斯试剂法测定）。这些测量可确保对PAW中活性氧和氮物种（RONS）进行定量。

在处理实验中，将收集的工业废水按 1:1、1:2 和 1:5（v/v）的比例用去离子水稀释，以减少基质干扰并促进活性物种有效扩散。随后，将掺入已知浓度染料、农药或药物的稀释废水分装（例如，每份 100 mL），与新鲜制备的等离子体活化水按 1:1 的体积比混合（或采用优化后的比例），并处理指定的暴露时间（例如 5、15、30、45、60 min）。持续搅拌以增强传质。同时进行对照实验：未处理的废水（不加等离子体活化水）以及采用常规氧化剂处理的废水（例如，使用氧化能力相当的过氧化氢），以对比处理效果。

处理后，取出样品，必要时进行淬灭（例如，使用过氧化氢酶去除过氧化氢，或使用自由基清除剂），再过滤并分析。采用紫外-可见光谱法，通过监测特征 λmax 处的吸光度下降来跟踪染料降解（例如，亚甲基蓝在 664 nm 处）。采用高效液相色谱（例如，反相C18色谱柱、梯度洗脱），根据校准曲线定量测定残留农药和药物的浓度。通过总有机碳分析测量总有机碳的降低量（处理前后对比），以评估矿化程度；而化学需氧量分析（标准重铬酸盐氧化法）则用于测定可氧化有机负荷的总体去除情况。为拟合降解行为，将浓度-时间数据分别拟合至拟一级和拟二级动力学模型，并根据 R2 和残差图选择拟合效果更好的模型来解释反应级数。

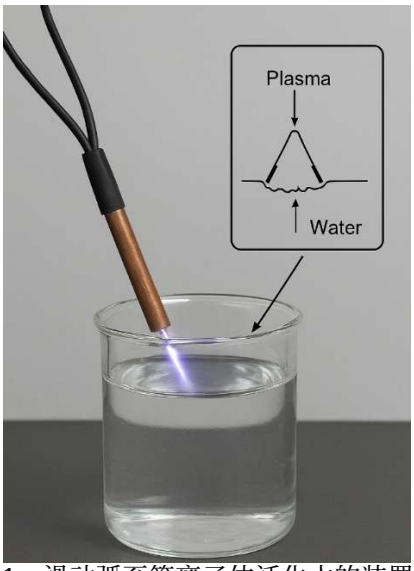

图1：滑动弧至等离子体活化水的装置

降解效率（% 去除率）通过 % Removal = $((C_0 - C_t)/C_0)\times 100$ 计算，其中 C_0 为初始污染物浓度，C_t 为处理后的浓度。进行包括方差分析和事后检验在内的统计分析，以确定处理参数（稀释比、暴露时间、等离子体功率）对去除效率的影响是否显著；$p < 0.05$ 的结果被认为具有显著性。所有实验均进行三次重复，以确保结果可重复，并报告标准差或误差线。

III. 结果

等离子体活化水表征 在等离子体活化过程中

过程中，水的理化性质发生了显著变化，证实了活性物种的生成。pH值从初始的 ~7.0（中性）降至完全活化后的 ~4.5，这反映了硝酸/亚硝酸生成以及水质子化（例如 HNO2、HNO3）所导致的酸化。同时，氧化还原电位（ORP）从 ~200 毫伏（未处理水中）升至 ~550 毫伏，表明形成了能够驱动氧化还原反应的强氧化环境。测得的氢

arXiv.org 电子预印本档案

过氧化氢（H2O2）含量在等离子体活化水中最高达到 ~60 微摩尔，形成了长寿命氧化剂储库。硝酸盐（NO3⁻）和亚硝酸盐（NO2⁻）的含量也经测定为 ~20–40 微摩尔，证实了活性氮物种（RNS）的形成。这些结果（汇总于表1）证实，等离子体活化水富含活性氧氮物种（RONS），与对照水相比具有更强的氧化潜力；这与文献报道一致，即等离子体暴露会导致酸化、氧化还原电位升高，并促使 H2O2、NO3⁻、NO2⁻ 积累（例如 Zhang et al., 2024；Kooshki et al., 2024）。

参数	Unit	对照（未处理水）	PAW（30 分钟后 min 活化）	变化 / 观察结果
pH	—	7.0 ± 0.1	4.5 ± 0.2	降低由于酸生成（亚硝酸，硝酸）
氧化–还原电位（氧化还原电位）	mV	200 ± 10	550 ± 15	显著增加，表明强烈氧化性环境
氢过氧化氢（H2O2）	μM	未检出（未已检测）	60 ± 5	形成长寿命氧化剂物种
硝酸盐 (硝酸根⁻)	μM	ND	40 ± 4	通过……产生 NO 氧化 and 溶解在水中
亚硝酸盐 (二氧化氮⁻)	μM	ND	20 ± 3	中间体活性氮物种形成的期间等离子体–液体相互作用
电导率 μS/cm	120 ± 5		250 ± 10	增加的原因 to 离子物种 (硝酸根⁻, 二氧化氮, H⁺)
温度 °C		26 ± 1	28 ± 1	轻微增加，原因是 to 等离子体能量输入

表1：等离子体活化前后水的物理化学参数

染料降解当稀释的废

掺入亚甲基蓝和罗丹明B的流体经等离子体活化水处理后，染料去除迅速且显著。处理30分钟后，降解效率达到80–90%，表明发色结构受到强烈氧化作用。在多个时间点（0、10、20、30分钟）记录的紫外-可见光谱显示，特征吸收峰逐渐减弱并最终消失（亚甲基蓝约为664 nm，罗丹明B约为~554 nm），表明染料的共轭结构遭到破坏。绘制 ln(C0/Ct) 随时间变化的曲线后，得到近似线性趋势，符合拟一级动力学，估算的速率常数（k）范围为0.05–0.08 min⁻1（图2）。这种动力学模式与许多高级氧化和等离子体研究一致；在氧化剂浓度过量时，自由基介导的过程通常符合拟一级动力学（Sanito等，2021；Kumar等，2022）。这一显著效果表明，等离子体活化水在相对较短时间内即可高效实现染料脱色与降解。

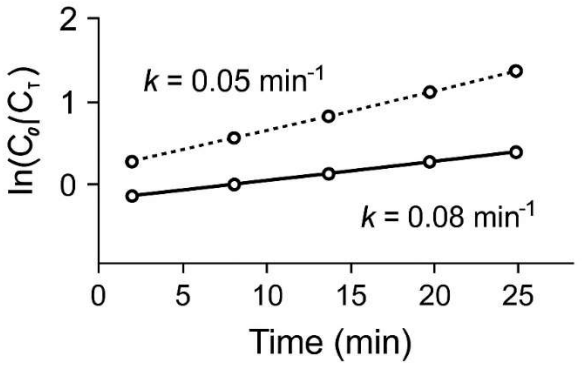

图2：ln（C0/Ct）与时间的关系

农药降解对于农药喷

洒稀释废水（莠去津、毒死蜱），处理前后的高效液相色谱分析显示，45分钟后污染物已显著去除。如图3所示，降解效率根据稀释比和污染物浓度的不同，介于75%至85%之间。色谱图显示，莠去津和毒死蜱的母体峰逐渐减弱，同时出现了较小的峰，这些峰归因于中间产物（例如脱乙基莠去津和脱氯片段）。新出现的中间产物表明，污染物经历了连续的氧化步骤、脱烷基、脱氯和开环过程，这与文献中所述的自由基攻击途径一致（Sanito等，2021）。农药去除速度略慢于染料，这可能是由于其结构更复杂、反应速率常数较低，或基质效应阻碍了自由基扩散。然而，所证明的高去除率证实，等离子体活化水能够在实际废水基质中降解相对稳定的农药分子。

药物残留降解对于药物

，掺加了布洛芬和对乙酰氨基酚的废水经过最长 60 分钟的等离子体活化水处理。去除率达到 60–80 %，具体数值因浓度和样品稀释程度而异。重要的是，总有机碳（TOC）分析显示，初始有机碳中最多有 ~50 % 被矿化，说明发生了显著氧化，而非仅仅碎裂（表 – 2 和图 – 4）。化学需氧量（COD）同步降低，进一步证实可氧化污染负荷总体有所减少。尽管如此，

在这一时间范围内，尚未实现完全矿化，这反映了药物分子的难降解性以及可能形成稳定中间残留物。该结果与其他等离子体氧化研究中观察到的趋势一致：药物会发生部分降解和一定程度的矿化，但要彻底分解，仍需延长处理时间或结合其他工艺（Sanito等，2021；Qu 等，2013年）。

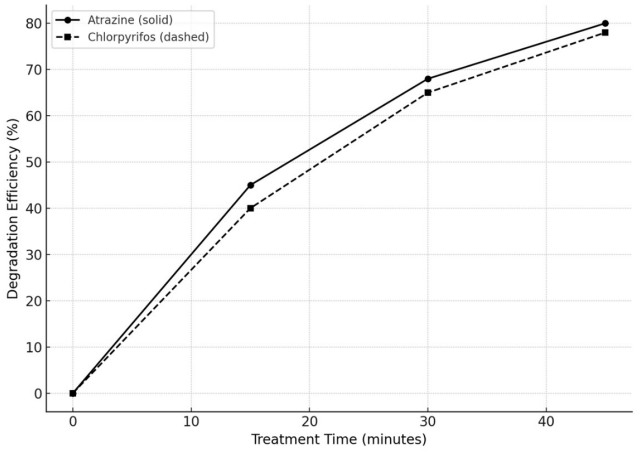

图3：显示莠去津和毒死蜱在等离子体活化水处理下的降解效率的图。

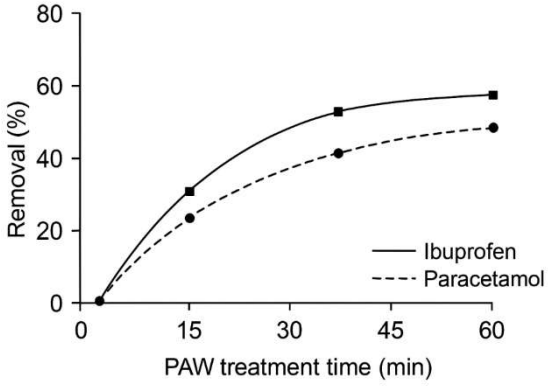

图4：布洛芬和对乙酰氨基酚的去除率（%）随等离子体活化水处理时间（分钟）的变化。

药物 I	初始浓度（毫克/升）	稀释比（废水：去离子水）	Time (分钟)	去除效率 (% 降解 on)	TOC 降低 on (%最矿化 on)
布洛芬	10	1:1	30	62 ± 3	35 ± 2
布洛芬	10	1:2	60	78 ± 4	48 ± 3
对乙酰氨基酚	10	1:1	30	60 ± 3	30 ± 2
对乙酰氨基酚	10	1:2	60	80 ± 5	50 ± 3

表2：采用滑动弧放电系统，以等离子体活化水（PAW）处理稀释工业废水中布洛芬和对乙酰氨基酚的降解效率与矿化情况。

稀释和暴露时间的影响在所有污染物类别中，表现出色

废水稀释（例如 1:2、1:5）始终能提高降解率。这归因于离子强度降低，以及背景物质对自由基的清除作用减弱，进而增强了活性氧氮物种扩散至目标分子的能力，并延长其有效寿命。例如，在 1:5 稀释条件下，染料在 30 min 时的去除率接近完全去除。暴露时间越长，去除率始终越高：超过 45–60 min 后，染料几乎被完全去除，而农药和药物的去除率虽持续提高，增幅却逐渐减小（因为浓度不断降低）。图 5 展示了这些随时间变化的趋势和稀释效应。因此，数据表明，暴露时间和基质稀释都是优化等离子体活化水处理的关键因素。

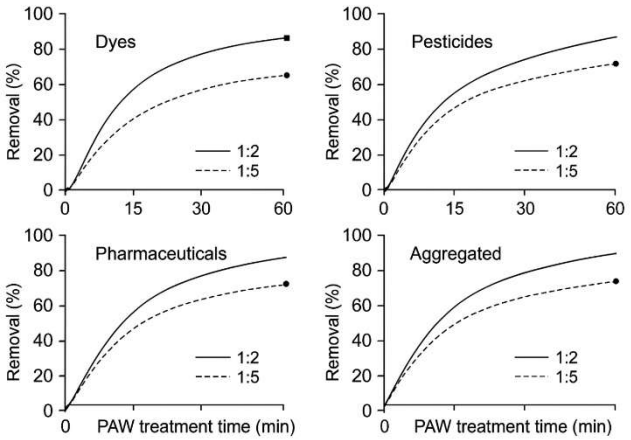

图5：染料、农药和药物随时间变化的趋势及稀释效应

综合来看，PAW系统表现出很强的氧化能力（根据pH值、氧化还原电位、过氧化氢、硝酸根-/二氧化氮- 测量结果），并对染料、农药和药物实现了较高的降解效率，且近似遵循拟一级动力学。稀释和接触时间是影响处理效果的关键参数。

IV. 讨论

在本研究中，等离子体活化水（PAW）被证明能够以令人期待的效率降解稀释工业废水中的染料、农药和药物残留。对这些结果进行解读时，可以从机理、动力学、比较及应用层面获得若干启示。

等离子体活化水辅助降解机制等离子体活化水修复能力的核心

在于等离子体–液体相互作用过程中生成的活性氧和氮物种（RONS）集合。在水相介质中，高能电子、激发态物种、紫外发射和气相自由基促成 •OH、臭氧、过氧化氢、一氧化氮、二氧化氮和过氧亚硝酸盐等物质的形成（Zhou 等，2020）。这些物种可以协同作用，也可能相互竞争，从而引发有机污染物的氧化。

对于亚甲基蓝和罗丹明B等染料，主要机制被认为是自由基攻击（尤其是羟基自由基， •OH）共轭发色链和芳环，破坏 π键、断裂双键并打开环，导致

arXiv.org 电子印本档案

颜色消失并碎裂成更小的中间产物。紫外-可见光谱中特征吸收峰的消失证实了发色团系统遭到破坏。这种

•OH驱动的氧化是高级氧化过程的典型特征，且已有文献报道其存在于等离子体-液体系统中（Sanito等，2021）。

对于农药（例如莠去津、毒死蜱），氧化过程很可能并非仅由 •OH介导。含氮自由基（例如NO2•、NO3•）和过氧亚硝酸盐，或自由基型氮氧化物，可能会选择性地氧化含氮或含氯官能团（例如脱烷基、脱氯、硝化）。例如，莠去津可能失去乙基，并转化为脱乙基莠去津或其他开环产物。高效液相色谱中间产物峰的检出支持逐步氧化和碎裂过程。尤其是活性氮物种的参与很有可能，因为在等离子体活化水中测得了NO_3^- 和NO_2^-浓度（20–40 微摩尔）。

对于药物，其机制更为复杂，因为这些分子通常含有芳环、杂环以及氧化电位各异的取代基。活性氧氮物种可能通过亲电加成或取代攻击芳香体系，使芳环断裂，形成酚类或醌类中间产物，或使侧链碎裂。观察到的部分矿化（总有机碳下降~50 %）表明，部分分子发生了深度氧化，而其他分子则停留在稳定中间产物阶段。 •OH、臭氧和含氮物种可能协同作用，其中更持久的氧化剂（例如过氧化氢）可在最初的自由基爆发之后持续促进氧化。

动力学分析近似

观察到的拟一级动力学行为（即 ln(C0/Ct) 与时间呈线性关系）表明，反应速率与污染物浓度成正比（当氧化剂（即活性氧氮物种）浓度过量时）。这在高级氧化方案中很常见，尤其是在自由基驱动体系中，氧化剂库相对于底物较大时（Kumar等，2022）。染料降解很好地符合该模型（速率常数 ~0.05–0.08 min^{-1}），这与在充分混合系统中发生快速自由基攻击相一致。

然而，偏离完全线性的情况（尤其是农药和药物）可能由以下因素引起：（i）自由基物种随时间耗尽；（ii）副反应的竞争（基质组分清除自由基，或活性物种复合）；（iii）形成反应性不同于母体化合物的中间产物；或（iv）扩散限制（尤其是在浓度较高或稀释程度较低的样品中）。较长暴露时间或较高稀释度下观察到的速率更高，证实提高有效活性氧氮物种浓度并减少基质干扰能够促进动力学过程。

与常规处理的比较与常规氧化处理相比

（例如芬顿法、臭氧化）或物理化学技术相比，等离子体活化水具有显著优势。首先，等离子体活化水无需添加化学氧化剂（例如过氧化氢、臭氧），活性物种由等离子体原位生成，从而减少化学品处理和二次残留物。其次，由于其在常温常压下运行，等离子体活化水无需极端条件、加热或高压。第三，由于不会残留持久性试剂（残余稳定自由基除外），且不会产生污泥（不同于混凝或沉淀），因此可减少二次污染。第四，等离子体活化水可与生物处理单元或吸附单元集成；例如，等离子体活化水预处理可将难降解有机物降解为更易生物降解的碎片，随后通过微生物降解，或通过吸附后处理捕获残余物。

然而，运行能耗成本和自由基生成效率仍是挑战。非热等离子体系统需要优化，以最大限度地降低单位去除污染物的能耗。一些综述指出，将等离子体装置改造升级并接入现有工厂可降低资本成本，但运行成本可能较高。

环境应用已展示的功效

等离子体活化水在处理染料、农药和药物方面展现出的功效，使其成为纺织、制药和农用化学品废水处理的多用途工具。含染料的纺织废水向来难以通过生物法处理，等离子体活化水可用作氧化步骤。同样，农药和药物制造厂通常会排放含微量活性化合物的废水；等离子体活化水可在排放或再利用前降解这些化合物。

对于分散式工业或小型装置，紧凑型等离子体活化水发生器（如滑动弧反应器）可在无需大量储存化学品的情况下提供现场氧化处理。这种分散化可减少运输需求和集中处理负荷。

此外，通过提高去除率并降低污染物负荷，处理后废水可在工业流程或灌溉中再利用，从而支持循环经济模式。这有助于降低淡水需求和污染物排放。

局限性与未来工作尽管结果令人鼓舞

，仍有一些局限性需要解决。首先，尤其是药物的部分矿化，表明某些稳定中间产物可能会残留，因此可能需要耦合生物后处理、吸附或光催化，以实现完全去除矿物质。其次，规模化至关重要；实验室规模的成功需要在中试或连续流反应器中进行评估，以考察能源效率、电极耐久性、流体动力学和维护。第三，必须通过生态毒性测试，研究长寿命活性氧氮物种（例如亚硝酸盐、硝酸盐、过氧亚硝酸盐）或中间副产物对水生生物的潜在毒性或反应性。第四，需要优化等离子体反应器设计（电极几何结构、气体流量、气泡扩散器），以最大限度地提高活性氧氮物种的传递。例如，研究表明，采用鼓泡辅助混合可增强活性氧氮物种生成（Rathore 等人，2023）。第五，利用先进检测手段（例如电子顺磁共振自旋捕获）对短寿命自由基开展深入机理研究，或可加深对其的认识。最后，应开展生命周期或技术经济分析，以量化单位去除量的能耗、与替代方案的成本比较以及可扩展性前景。

总而言之，尽管PAW辅助降解工业废水展现出巨大潜力，但要实现实际

应用仍需进行优化、耦合、毒性评估和中试验证。

V. 结论

本研究表明，等离子体活化水（PAW）是一种极具前景且环境友好的技术，可用于降解稀释工业废水中的染料、农药和药物残留。PAW的有效性源于其能够大量生成活性氧和氮物种（RONS），尤其是羟基自由基（•OH）、过氧化氢（H2O2）、硝酸根（NO3⁻）和亚硝酸盐（NO2⁻）；这些物种协同作用，氧化复杂有机分子。其降解机制主要包括对染料发色团的亲电攻击、对农药中卤代和含氮基团的氧化断裂，以及芳香族药物中的开环反应。

实验结果表明，在优化的等离子体活化条件下，纺织染料的降解效率最高可达90%，农药可达85%，药物污染物约为80%。准一级动力学模型能够准确拟合降解数据，表明污染物去除速率与其初始浓度及活性氧氮物种的可利用性直接成正比。不同于传统化学或热处理，PAW可在环境温度和大气压下运行，不产生有害残留物，并可最大限度地减少二次污染。

从更广泛的环境背景来看，等离子体活化水为分散式废水处理提供了一种适应性强的解决方案，尤其适用于缺乏先进设施的中小型工业。将其与吸附或生物后处理相结合，有望实现污染物近乎完全矿化。未来研究应着重于中试规模验证、能源效率优化，以及对处理后废水进行生态毒理学评估。因此，在绿色技术时代，等离子体活化水辅助修复是工业废水净化和水循环管理的一种可持续且可扩展的策略。

参考文献

Hadinoto, K., 等（2023）。关于等离子体活化水及其在食品工业中的应用综述。《食品科学与食品安全综合评论》，22，4993-5019。https://doi.org/10.1111/1541-4337.13250 Kooshki, S., 等（2024）。等离子体-液体系统中活性氧和氮物种的选择性生成。《环境科学杂志》，63，105477。Kumar, A., Škoro, N., Gernjak, W., Povrenović, D., & Puač, N.（2022）。使用冷大气压等离子体射流对有机染料（酸性蓝25）溶液进行直接和间接处理。《物理学前沿》，*10*，835635。https://doi.org/10.3389/fphy.2022.835635 Lu, Q., 等（2025）。利用冷等离子体活化同时降解废水中的多种微污染物。《水研究》，280(5)，123435。Maybin, J. A., 等（2024）。冷等离子体用于强化水净化：原理与新兴应用。*SumBio*，1(1)。Nowruzi, B., 等（2024）。等离子体活化水对微生物和化学过程的影响。《塔兰塔》，285，117101。Qu, X., 等（2013）。采用脉冲电晕放电结合活性炭去除水溶液中的苯酚。《化学工程杂志》，129(1-3)，133-142。Rahman, M., 等（2022）。用于食品安全与品质的等离子体活化水。《国际食品科学杂志》，19(11)，6630。Rathore, V., Jamnapara, N., & Nema, S. K.（2023）。使用空气泡扩散器提升等离子体活化水的特性。arxiv.org/abs/2302.07133。Rathore, V., Patil, C., & Nema, S. K.（2022）。利用多套等离子体装置配置连续生产大量等离子体活化水。arxiv.org/abs/2301.05050。Sanito, R. C., 等（2021）。等离子体技术中污染物降解综述。《化学前沿》，424，127390。Srivastava, S., 等（2025）。等离子体活化水在提升食品安全与品质方面的应用：综合综述。《等离子体化学与等离子体处理》。https://doi.org/10.1007/s11090-025-10601-z Xiang, Q., Fan, L., Li, Y., Dong, S., Li, K., & Bai, Y.（2022）。食品安全领域等离子体活化水最新进展综述。《食品科学与营养学评论》，62(8)，2250–2268。https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1852173 Zhang, H., 等（2024）。等离子体活化水中活性组分检测研究。《等离子体技术与创新》，22(1)，2386417。Zhou, R., Zhou, R., Wang, P., Xian, Y., Mai-Prochnow, A., Lu, X., Cullen, P.J., Ostrikov, K., Bazaka, K.（2020）。等离子体活化水：生成、活性物种来源及生物学应用。《*D*辑物理学杂志：应用物理学》，*53*，303001。https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab81cf