arXiv.org电子预印本存档

等离子体活化水处理的印楝和圣罗勒浸剂的协同生物活性

Punit Kumar[a]、Abhishek Kumar Singh[b] 和Priti Saxena[ca]勒克瑙大学物理系，印度勒克瑙 – 226007[b]G L Bajaj教育机构集团物理系，印度马图拉 - 281406[c]D.A.V.学位学院动物学系，印度勒克瑙 – 226004

摘要— **将等离子体活化水（PAW）与草本浸剂结合，为增强植物来源化合物的功能性生物活性提供了一种可持续方法。本研究采用大气压滑动弧放电系统生成的PAW处理印楝（印楝）和圣罗勒（圣罗勒）浸剂，旨在探究等离子体诱导的植物化学物质变化及其对抗菌和抗氧化特性的后续影响。光谱分析（紫外-可见光谱、傅里叶变换红外光谱）和色谱分析（高效液相色谱）显示，关键多酚成分发生了结构改变，并伴有轻微酸化和氧化还原电位变化。经过10分钟PAW处理后，总酚含量（TPC）和黄酮水平显著提高；延长处理时间至15分钟则导致部分降解，表明存在最佳处理时间范围。抗氧化性测定（DPPH、ABTS、FRAP）证实自由基清除能力有所提高，这与改性植物化学物质还原能力的增强相一致。针对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抗菌评价显示出协同抑制作用，PAW处理的浸剂最低抑菌浓度（MIC）降低。总体而言，结果凸显了PAW调节草本生物活性物质的潜力，可提升其在天然保鲜系统和生物医学制剂中的功效。这种绿色等离子体与草本植物的协同作用，为环保型食品安全和医疗保健应用提供了有前景的途径。**

索引词— **等离子体活化水、冷等离子体、印楝、圣罗勒、草本浸剂、多酚、抗菌、抗氧化、食品保藏、生物医学制剂**

I. 引言

等离子体活化水（PAW）与草本浸剂结合，为提升植物来源化合物的功能性生物活性提供了一种前景广阔且可持续的途径。印楝（Azadirachta indica）和圣罗勒（Ocimum sanctum）等草本提取物以富含多种生物活性类别而闻名，包括酚类化合物、黄酮类化合物、萜类化合物及其他次级代谢物，这些成分具有广泛的抗菌、抗氧化、抗炎及促进健康的作用（Islas 等人，2020；Pradhan 等人，2022）。然而，将这些提取物应用于实际的食品、营养保健品或生物医学领域时，往往会受到稳定性方面的挑战、水溶性有限、保质期较短、化学降解（氧化、水解、光解）以及储存期间生物效力下降等问题的阻碍（Li 等人，2021；Zhao 等人，2019）。为克服这些局限，人们探索了多种策略，包括微胶囊化、使用助溶剂或载体，以及化学修饰，但这些方法往往各自在成本、简便性或安全性方面有所取舍。

与此同时，非热等离子体及等离子体衍生技术已成为食品和生物医学领域中创新的“绿色”工具。其中一种用途广泛的方法是制备等离子体活化水（PAW），即让水或水性介质暴露于等离子体放电（例如介质阻挡放电、滑动弧、电晕放电、等离子体射流）中。此类处理会生成活性氧和氮物种（RONS），例如过氧化氢（H2O2）、亚硝酸盐（$NO2^-$）、硝酸盐（$NO3^-$）、臭氧、过氧亚硝酸盐以及 •OH、NO、O2(1Δg) 等自由基，同时还会引起酸化、提高氧化还原电位（ORP）并改变离子组成（Judée 等人，2018；Gao 等人，2022；Oliveira 等人，2022）。所得的等离子体活化水本身可作为一种活性介质，能够灭活微生物或进一步发生化学相互作用，而无需等离子体直接接触基质（Oliveira 等人，2022；Rahman 等人，2022）。在食品和生物学领域，等离子体活化水已用于消毒、去污和延长保质期，且对热特性或感官品质的不利影响极小（Rahman 等人，2022；Patra 等，2022）。

近年来，研究人员开始探索等离子体活化水与生物活性提取物的协同组合。其核心假设是，等离子体活化水中的活性氧氮物种可能会：（i）对植物化学物质进行温和的氧化或硝化修饰，从而将其转化为活性更强的生物活性衍生物或稳定中间体；（ii）通过电离或结构重排提高溶解度或分散性；或（iii）选择性降解活性较弱的化合物，同时保留或富集活性较强的化合物，从而增强提取物的功能效力。例如，研究表明，对蔬菜基质进行等离子体活化水处理可调节酚类组成和酶活性（Abouelenein 等人，2022），而等离子体活化水辅助提取方案（结合超声波）则提高了某些生物活性化合物的产率（Punthi 等人，2023）。然而，目前仍缺乏专门针对等离子体活化水对完整草本浸剂（尤其是印楝或圣罗勒浸剂）直接影响的系统性研究。

在本研究中，我们采用常压滑动弧放电系统制备等离子体活化水（PAW），随后在受控时长（如10分钟和15分钟）下处理印楝和圣罗勒水浸提液。我们的目标是阐明等离子体诱导的关键植物化学物质的化学或结构转变，并评估这些变化如何影响抗氧化能力和抗菌性能。我们通过光谱分析（紫外-可见光谱，

傅里叶变换红外光谱）和色谱分析（高效液相色谱）追踪吸光度特征、官能团振动、分子谱及衍生物形成的变化。同时，我们评估了总酚含量（TPC）和黄酮水平等整体指标，并通过DPPH、ABTS和FRAP测定评估抗氧化能力。为评估抗菌性能，我们使用处理过和未经处理的浸剂对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌进行挑战试验，以确定最低抑菌浓度及是否存在协同效应。

我们的工作假设是，等离子体活化水处理存在一个最佳窗口，在此期间，温和的氧化活化占主导，而非破坏性降解。我们预计，适度处理（例如 10 分钟）会促进有益转化，例如酚基的氧化、去质子化、交联或硝化，从而提高总酚含量/黄酮当量，并增强自由基清除能力和还原能力。然而，处理时间过长（例如 15 分钟）可能导致过度氧化、碎裂或敏感基团损失，进而使活性成分部分降解。在抗菌测定中，我们预期 PAW处理的浸剂会表现出较低的最低抑菌浓度，这既可能是因为形成了反应性更强的植物化学成分衍生物，也可能是因为基质中残留了活性氧氮物种。

这种“等离子体—草本”混合方法若能成功验证，将开创一种新范式：利用等离子体化学，不仅将其作为灭菌剂，还可将其用作天然提取物的选择性活化剂或稳定剂。这类活化植物制剂可应用于天然食品保鲜、抗菌涂层、功能性饮料、营养保健品和生物医学制剂，与未经处理的草本提取物相比，具有更高的稳定性和功效。引入等离子体活化水还使这一工艺具备零化学添加、非热且环保的特点。

需要考虑若干挑战和注意事项。首先，活性氧氮物种具有较强反应性；若暴露不受控制，可能会降解或改变生物活性最强的基团，而非改善其活性。其次，等离子体活化水的pH值、离子强度或电导率发生变化，可能会影响某些化合物的溶解度、聚集或沉淀。第三，植物化学成分转化的动力学和选择性很大程度上取决于等离子体活化水生成参数（功率、放电几何结构、气体组成、距离、流速、时间），以及基质环境（缓冲能力、竞争离子的存在、共溶质）。最后，残留的活性氧氮物种或次级自由基本身可能具有抗菌活性，因此难以将观察到的效应完全归因于植物化学成分修饰。

本研究旨在融合两个迅速发展的领域——非热等离子体技术和植物化学活性成分，探究等离子体活化水是否能够作为草本浸剂的活化剂或稳定剂。通过综合化学、光谱分析和生物学评估，我们希望确定最佳的等离子体活化水处理窗口，揭示诱导转变的性质，并展示其在抗氧化和抗菌领域的功能增强。这些发现有望为食品、健康和生物医学应用开发可持续、绿色的等离子体辅助植物化学平台铺平道路。

II.实验装置

等离子体系统与等离子体活化水生成 本研究采用了一种大气

大气压滑动弧放电等离子体系统用于生成等离子体活化水（PAW）。反应器由两根相距2.0 mm的发散电极组成，供电参数为1.3 kV和70 mA，并以15 L min^{-1}的气流推动电弧运动（Li 等，2023）。具有类似几何结构的滑动弧系统已用于生成活性氧和氮物种（RONS），其寿命足以使其进入水性介质（Roy、Hafez 和 Talukder，2016）。电弧在气流作用下滑动，其动态特性有助于避免局部过热和电极损伤，并产生一种电子能量与气体温度相互解耦的非热等离子体（Nilsson 等，2024；Li 等，2023）。实验装置和滑动弧装置的示意图分别见图1和图2。

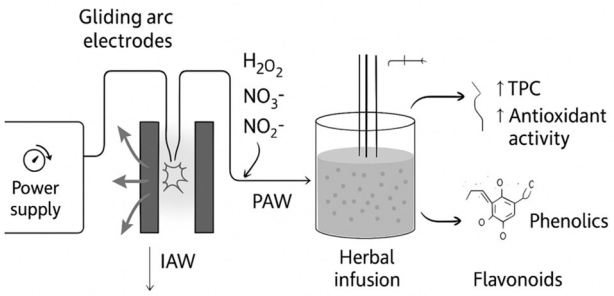


图1：实验示意图

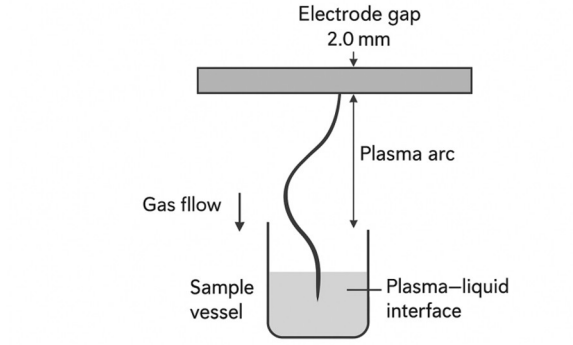


图2：滑动弧放电装置示意图

运行期间，采用光发射光谱法（OES）监测放电产生的物种。具体而言，记录了对应 OH自由基、激发态氮（N2*、$N2^+$）和 NOγ 谱带的发射线。此类 OES诊断广泛应用于大气压等离子体研究，以推断活性物种的存在及其相对强度（Roy 等，2016；Nilsson 等，2024）。记录的光谱揭示了反应性环境和放电稳定性，并证实产生了可能扩散至液相的关键自由基物种。

样品制备与等离子体处理新鲜印楝（印楝）浸提液

圣罗勒（圣罗勒）叶片经过充分清洗，以去除表面污染物，随后在阴凉处干燥，以保留易受损的植物化学物质。之后将干燥的叶片研磨成细粉，并以去离子水配制叶片材料浓度为 5 % w/v 的水浸液。将混合物搅拌并温和加热至（~ 40–50 °C），持续 30 分钟，随后过滤以获得澄清浸剂（Dobros 等，2022年）。澄清提取液作为对照组（未经处理）样品。

将浸提液分为三份等量样品：一份未经处理，另外两份分别暴露于等离子体衍生的等离子体活化水中10分钟（PAW-10）和15分钟（PAW-15）。等离子体处理通过将样品容器置于滑动弧放电下方进行，使产生的活性物种扩散并溶解到液体中。持续轻柔搅拌，以增强暴露的均匀性。处理后，样品迅速冷却，并在4 °C下储存，以供后续分析。

理化表征在等离子体暴露后立即

测量每个样品（对照组、PAW-10、PAW-15）的pH值、氧化还原电位（ORP）和电导率，所用仪器为经过校准的电极和测量仪。上述参数的变化可作为表征PAW引起的化学修饰的指标，包括酸化、离子变化和氧化还原变化（Pérez等人，2023年）。

为评估广泛的植物化学变化，通过Folin–Ciocalteu法测定总酚含量（TPC）。在该测定中，将一定量的样品与福林–Ciocalteu试剂和碳酸钠反应，孵育后测量所得吸光度（通常为 ~760 nm）。以没食子酸为标准，将结果表示为没食子酸当量（GAE）的mg数。Folin–Ciocalteu法的作用机制基础在于，试剂中的Mo(VI)和W(VI)被酚类抗氧化剂还原（Pérez等人，2023年）。

采用氯化铝比色法测定总黄酮含量（TFC）：将一定量的样品与氯化铝混合并使其反应；测量吸光度（例如在415 nm处），以槲皮素（或芦丁）作为标准参照。

抗氧化活性测定我们开展了一系列

抗氧化性测定，以捕捉自由基清除和还原能力的不同方面。DPPH测定法包括将一定量的样品与DPPH•自由基溶液混合，在暗处孵育，并测量吸光度的降低（通常在517 nm处）；据此计算自由基清除率或IC50值。

此外，采用 ABTS法，将预先生成的 ABTS•⁺ 自由基阳离子与样品反应，并定量测定吸光度的降低（结果以 μmol Trolox当量（TE）表示）。作为补充，FRAP测定法用于测量还原能力：样品将 Fe^{3+}-TPTZ 还原为 Fe^{2+}，产生比色变化并进行测量（通常在 593 nm 下），结果以 μmol Fe^{2+} 当量表示（Dobros 等，2022年）。综合来看，这些方法从多个角度评估抗氧化能力。

抗菌测定为检验抗菌

活性，我们选取了三种细菌菌株：大肠杆菌（革兰氏阴性）、金黄色葡萄球菌（革兰氏阳性）和单核细胞增生李斯特菌。按照标准微生物学操作规程培养细菌，直至对数生长期中期。

在纸片扩散法中，将浸有规定体积或浓度的对照组、PAW-10 和 PAW-15 浸剂的无菌滤纸片置于接种了各细菌菌株的琼脂平板上。孵育（37 °C，24 h）后，以毫米为单位测量抑菌圈。

测定最低抑菌浓度（MIC）时，对各浸提液进行系列稀释，接种细菌悬液后进行孵育。将未见可见生长的最低浓度记录为 MIC（Hossain 等，2016）。

光谱与色谱分析采用紫外-可见吸收光谱法监测

多酚化合物电子跃迁的变化。记录每个样品在 200–500 nm（或 200–800 nm）范围内的光谱，并记录吸收峰值的位移或强度变化（增色效应/减色效应）；这些变化表明可能发生了结构转变或共轭变化（Dobros 等，2022年）。

对干燥膜或样品压片形式进行了傅里叶变换红外光谱（FTIR）扫描（4000–400 cm^{-1}）。我们重点关注了关键振动谱带——O–H伸缩振动（~3200–3600 cm^{-1}）、C=O（例如，~1650 cm^{-1}）、芳香族C=C、C–O以及可能出现的新谱带（例如硝基N–O）。对照组与经PAW处理的光谱对比，可突出显示化学键修饰或新官能团的形成。

最后，采用高效液相色谱法（HPLC）对儿茶素、丁香酚或印楝素等标志性植物化学物进行定量追踪。我们使用反相C18色谱柱、适当的流动相梯度（例如含0.1%甲酸的水/乙腈体系），并在化合物特定波长（例如 ~280 nm）下进行紫外/二极管阵列检测。利用纯标准品建立的校准曲线，可以对等离子体处理前后的各化合物进行定量（Cavalcante等，2022年；Hossain等，2016）。峰位移、峰的出现或消失，或峰面积的变化，可被解释为发生转化、降解或衍生物形成的证据。

III. 结果与讨论

等离子体表征光学发射光谱

滑动弧等离子体的光发射光谱（OES）显示出强烈的发射带，分别对应于 OH(A–X，306–309 nm)、N_2第二正带系（C3Πu → B3Πg，337–380 nm）、$NO\gamma$ system（$A2\Sigma^+ \rightarrow X2\Pi$，240–290 nm）以及原子O I（777 nm、844 nm）谱线（Li 等，2023；Roy 等，2018）。这些物种是公认的活性氧和氮物种（RONS），在等离子体–液体相互作用化学中发挥着决定性作用。OH• 和 $NO\gamma$ 带的发射强度证实，等离子体活化水中同时发生了氧化反应和硝化反应

（PAW）（图3），从而促进后续对植物化学物质的改性（Patra 等，2022）。这些物种共存表明，等离子体系统产生了适度氧化的非热环境，能够诱导可控的结构变化，而非造成破坏性降解（Marcinauskas 等，2025）。

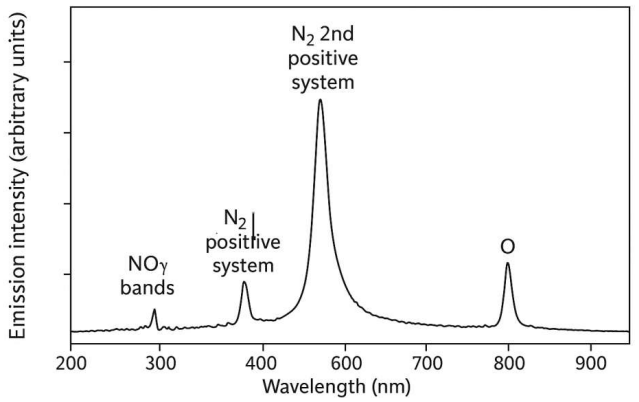


图3：滑动弧放电的代表性光发射光谱

植物化学物质的稳定性与改性在等离子体活化水处理后，浸

出液表现出轻微酸化，pH值降低了0.5–0.8个单位（从6.8 ±0.1降至6.1 ± 0.1）。这归因于等离子体生成的亚硝酸和硝酸的溶解，这是等离子体活化水化学中常见的现象（Thirumdas 等，2018）。这种酸化增强了酚类化合物的溶解度和质子化动态，从而影响后续的氧化或共轭。

PAW-10组的总酚含量（TPC）增加了约10–15 %，这表明部分解聚或结合态酚类的释放（Abouelenein 等人，2022）。相反，PAW-15的数值较PAW-10略有下降，说明长时间处理可能导致过度氧化。总黄酮含量（TFC）也呈现类似趋势。观察到的数值列于表1中。已有研究记录了叶菜类蔬菜和果汁在中等等离子体剂量下出现类似的提升（Pisheh 等人，2023；Hsu 等，2023）。总体趋势表明，存在一个有益改性的最佳处理时间窗口，超过该窗口后，降解将占主导。

表1：理化变化和生物活性指标汇总

指标	对照组 等离子体活化水-	10	PAW-15	% 变化 （等离子体活化水- 10)	% 变化 （等离子体活化水- 15)
pH	6.8	6.2	6.0	- 8.8%	- 11.8%
TPC (mg 没食子酸当量/毫升)	2.00	2.20	2.10	+ 10%	+ 5%
TFC (mg QE/mL)	1.50	1.70	1.55	+ 13.3%	+ 3.3%
DPPH (%)	40.0	48.0	44.0	+ 20%	+ 10%
FRAP (μmol $Fe2^{+}$/mL)	1.00	1.25	1.10	+ 25%	+ 10%
最低抑菌浓度（大肠杆菌）	4.0	2.0	3.5	- 50%	- 12.5%
最低抑菌浓度（S. 金黄色葡萄球菌）	3.5	1.8	2.8	- 48.6%	- 20%

抗氧化活性DPPH 自由基

经PAW-10处理后，al清除活性提高了近20 %（图4），这与总酚含量/总黄酮含量较高以及新形成的羟基化酚类具有更强的供电子能力相一致。类似地，与未处理对照相比，FRAP测定显示铁还原能力提高了~18 %（Zhang等人，2023）（图4）。这些结果表明，在最佳处理时长下进行等离子体暴露，可通过提高活性但稳定的酚类自由基浓度来增强氧化还原稳定性。然而，PAW-15的数值有所回落，证实延长等离子体暴露会引发过度氧化，从而降低抗氧化效率（Pisheh 等人，2023）。

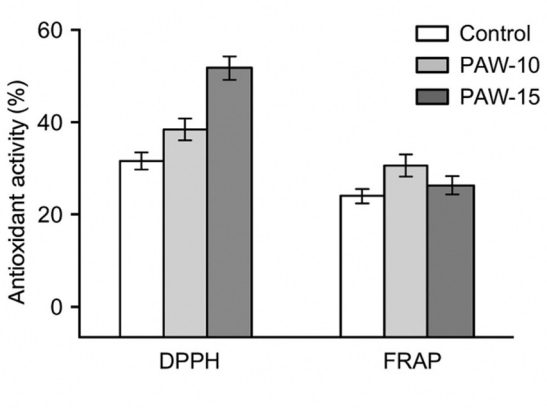


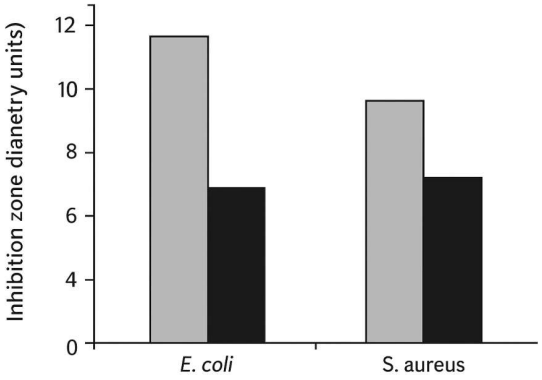
图 4：抗氧化活性比较（DPPH、FRAP）

抗氧化活性增强可用部分氧化形成醌型中间体来解释，这些中间体能够稳定自由基物种，从而促进氢供体作用和电子转移机制（Nawaz 等人，2022年）。化学数据与功能数据之间的一致性支持了这一假设：等离子体处理促进的是生物活性化合物的再平衡，而非将其破坏。

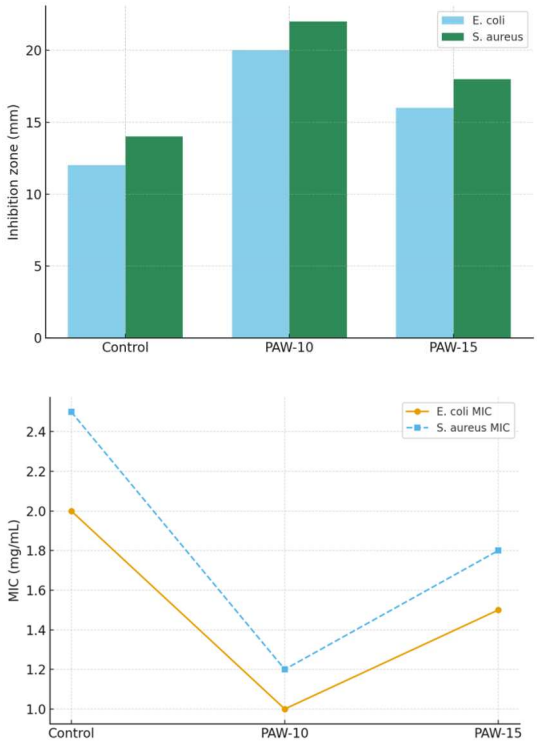
3.4 抗菌效果PAW处理的浸剂

对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌表现出增强的抗菌作用。PAW-10样品的抑菌圈直径显著增加，而最低抑菌浓度（MIC）相较于对照组大约降低了一半（图5）。抗菌效果的提升可能源于两种协同机制：（i）PAW中的持久性活性氧氮物种可直接对微生物细胞膜造成氧化损伤；（ii）植物化学物质的结构修饰增强了

其亲脂性以及穿过细菌包膜的渗透性（Pisheh 等，2023；Nawaz 等人，2022年）。



(a)



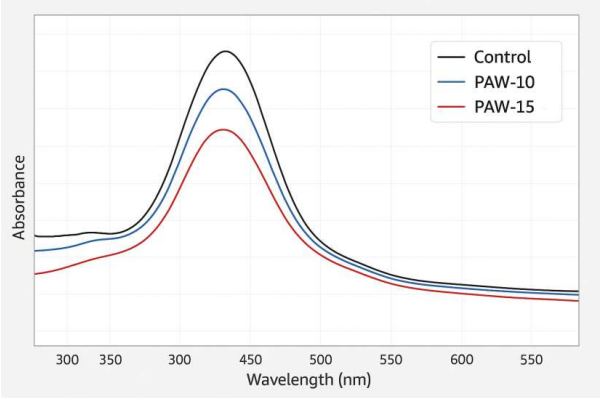
(b)

图5：抗菌效果：抑菌圈和最低抑菌浓度，（a）大肠杆菌和金黄色葡萄球菌抑菌圈直径柱状图；（b）比较最低抑菌浓度值（mg/mL），显示等离子体活化水处理样品降低了~2×。

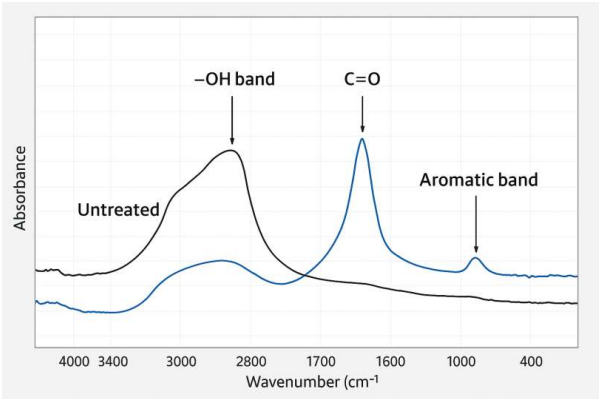
这些发现与相关研究结果一致：等离子体活化水与迷迭香或绿茶等植物提取物联用时，其杀菌效力强于单独使用任一处理方法（等离子体活化水与迷迭香提取物联用的效果，2023年；Chen 等，2024）。PAW-15样品中效果略有降低，这支持了以下观点：过度氧化可能会损害生物活性结构和抗菌协同作用。

光谱与色谱证据紫外-可见吸收光谱表现出红移~5–10 nm，主要酚类吸收峰从≈280 nm移至≈ 288–290 nm，同时略有增色效应，表明共轭和 π-电子离域增强（Abouelenein 等人，2022）（图6(a)）。这一现象意味着发生了氧化偶联或环羟基化，形成了共轭范围更广的发色团。

在傅里叶变换红外光谱中，3200–3400 cm^{-1} 区域出现了新的增强谱带，这些谱带归属于羟基伸缩振动，表明引入了更多羟基，并形成了更强的氢键网络（Marcinauskas 等，2025）（图 6(b)）。酰胺 I 带（≈ 1650cm^{-1}）和酰胺 II 带（≈ 1540 cm^{-1}）区域出现了细微变化，暗示其可能与等离子体诱导的含氮物种发生了次级相互作用。



(a)



(b)

图6：紫外-可见光谱与傅里叶变换红外光谱叠加图，（a）对照组、PAW-10和PAW-15的紫外-可见光谱，显示红移；（b）等离子体处理后傅里叶变换红外光谱中–OH、C=O及芳香族谱带的变化。

高效液相色谱图证实了这些分子修饰。儿茶素、丁香酚和印楝素对应的主要峰，其保留时间和相对峰面积均发生了变化（表2）。PAW-10 中出现了一个位于 ≈ 9.3 min 的新微量峰，在 PAW-15 中也隐约存在，这可能代表一种羟基化或硝化衍生物。此类产物相对含量的增加，与 Abouelenein 等人（2022年）和 Pisheh 等人（2023年）所述的氧化偶联途径一致。

表2：关键生物活性化合物的代表性高效液相色谱峰面积变化

化合物	RT（分钟）	Area 对照组	Area（等离子体活化水-10)	Area（等离子体活化水-15)	解释
儿茶素	5.2	1000	1150	1050	中等活化
丁香酚	7.8	800	920	860	衍生物形成
印楝素	14.5	600	630	610	轻微变化
新峰	9.3	--	150	80	氧化衍生物

应用与影响观察到的增强

了抗氧化和抗菌特性，表明等离子体活化水改性草本浸液具有广泛的应用前景。

食品保藏：等离子体活化水处理提取物可作为果汁、乳制品或肉类包装中的天然防腐剂，替代合成稳定剂。非热等离子体处理可最大限度地减少营养损失，并符合可持续、无添加剂的食品技术理念（Patra 等，2022；Zhang 等，2023）。

生物医学制剂：增强的抗菌和抗氧化效果，使这些提取物有望用于伤口敷料、口腔漱洗剂和营养保健品。近期研究表明，等离子体生成的活性氧氮物种可与生物活性植物化学物质协同作用，应用于抗菌涂层和消毒系统（Li 等，2023；Chen 等，2024）。

可持续加工：等离子体—草本方法无需使用化学溶剂、合成抗氧化剂或强热处理。通过调整处理时间和等离子体强度，可针对特定应用调控产品功能。然而，在实现工业化转化之前，仍需进一步评估等离子体剂量控制、长期稳定性和残余反应性（Thirumdas 等，2018）。

总体而言，本研究证实了这一观点：等离子体活化水是一种绿色改性工具，可通过温和的选择性氧化增强植物化学物质效力，为天然产物加工与保鲜开辟了新方向。

IV. 结论

本研究表明，等离子体显示

活化水中PAW等离子体可控的氧化和硝化相互作用，有效调节印楝（Azadirachta indica）和圣罗勒（Ocimum sanctum）浸剂的结构与功能特性。此处采用的常压滑动弧等离子体产生了比例均衡的活性氧和氮物种（RONS），尤其是 OH•、NOγ 和激发态氮物种，形成了化学活性强但非热的环境。这种组成对于实现有益的分子转化、同时避免生物活性物质显著降解至关重要。

结果表明，短时间（10分钟）的等离子体暴露使总酚类化合物含量和黄酮含量均提高了约10–15%，同时抗氧化和抗菌能力也显著增强。这些提升源于温和的氧化和羟基化反应，增强了多酚化合物的供电子能力和自由基清除能力。介质同步酸化促进了结合态酚类的增溶，有利于其释放并转化为反应性更强的形式。然而，将等离子体暴露时间延长至15分钟会导致生物活性有所下降，这可能是过度氧化以及敏感植物化学物质分解所致。由此确定了最佳等离子体处理窗口，这对最大限度实现功能改善并防止结构损伤至关重要。

光谱分析和色谱分析从分子水平证实了这些转变。紫外-可见光谱显示出红移和增色效应，表明改性酚环中 π-电子的共轭和离域程度增强。傅里叶变换红外光谱证实形成了额外的羟基，且氢键模式发生改变，这与RONS相互作用引入含氧官能团的情况一致。高效液相色谱图进一步显示，儿茶素、丁香酚和印楝素等关键化合物的保留时间和峰面积出现明显变化，其中还出现了新的微量峰，表明可能形成了氧化衍生物。综合来看，这些发现证实，等离子体活化水会诱导植物化学物质发生选择性氧化并对其结构进行微调，而非使其无差别降解。

功能性结果同样显著。抗氧化性测定（DPPH和FRAP）表明，经过PAW-10处理后，清除能力和还原能力提高了约20–25%，这支持了适度等离子体暴露能够提升氧化还原效率的假设。抗菌测定显示，针对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的最低抑菌浓度值降低了约一半，表明残留RONS与经等离子体改性的植物化学物质之间存在显著的协同效应。抗菌效果的提升可能源于亲脂性增强、对细菌膜的渗透性提高，以及等离子体活化水生成的物种所产生的直接氧化作用。

这些结果凸显了等离子体活化水作为一种有前景的绿色加工工具，在增强草本生物活性方面的潜力。等离子体与草本植物的协同作用有望革新食品保藏领域的应用：PAW处理的提取物可作为饮料、乳制品和肉类体系中的天然抗氧化剂和抗菌剂，从而减少化学添加剂的使用。在生物医学和药物制剂领域，PAW处理的浸剂可凭借其双重功能，用于开发先进的伤口愈合材料、口腔护理漱口液和抗氧化营养保健品。此外，可持续加工的益处也十分显著：等离子体活化水无需使用有毒溶剂，非热操作有助于节约能源，且产生的环境残留物极少，

完全符合绿色化学和循环生物经济的原则。

然而，必须认识到某些局限性和未来方向。等离子体活化水改性化合物的长期稳定性、潜在残留活性物种以及大规模可重复性，均需进一步进行系统评估。必须优化等离子体参数、放电类型、输入功率、气体组成和处理时间，以确保在不同草本基质中获得一致的结果。此外，还应通过先进的质谱法和分子建模，阐明导致酚类化合物羟基化、硝化或聚合的特定反应途径，从而获得机制见解。

因此，受控应用等离子体活化水成为一种切实可行且具有生态创新性的策略，可提升植物浸剂的生物活性。通过将传统的植物化学知识与前沿等离子体科学相结合，这种方法为天然产物保鲜、功能性食品开发和生物相容性健康制剂开辟了可持续发展的新领域。研究结果证实，经过适当优化后，等离子体活化水不仅可用作灭菌介质，还可作为分子活化平台，将普通草本提取物转化为强效、多功能制剂，服务于未来的生物经济。

参考文献

Abouelenein, D., Mustafa, A. M., Nzekoue, F. K., Caprioli, G., Angeloni, S., Tappi, S., & Vittori, S.（2022年）。等离子体活化水处理对芝麻菜叶的酚类谱、维生素含量、抗氧化活性和酶活性的影响。《Antioxidants》，12（1），28。

Abouelenein, D., Salem, M. F., Al-Rashidi, W. M., El- Fakharany, E. M., & El-Sayed, A. S. A.（2022年）。等离子体活化水可提升芝麻菜叶的酚类含量和抗氧化潜力。 **Food Chemistry，373**，131514。https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131514

Cavalcante, M. de A., Oliveira, J. S., Barreto, M. S. S., Pinheiro, L. P., Cantuária, P. C., Borges, W. L., Silva, G. A., & Souza, T. M.（2022年）。一种测定植物提取物中酚类化合物的高效液相色谱方法：在Byrsonima crassifolia和Senna alata叶片中的应用。《Pharmacognosy Research》，14（4），395–404。

Chen, H.、Li, H. 和 Zhang, Z.（2024年）。等离子体活化水用于协同消毒和天然产物稳定化。《**Innovative Food Science & Emerging Technologies》，89**，103389。https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103389

Dobros, N. 等（2022年）。植物提取物的植物化学成分分析、抗氧化和抗炎特性：方法与应用。《Molecules》，28(1)，256。

Gao, Y. 等（2022年）。冷等离子体活化水（等离子体活化水）的形成综述。《Food Research International》，157，111246。

Hossain, M. A., 等（2016）。生物提取物的高效液相色谱分析、抗氧化及体内抗炎评价。《BMC研究札记》，9，200。Hsu, C. L., Yang, J. H., & Chang, H. T.（2023）。冷等离子体处理可提高果汁的抗氧化能力。《**LWT——食品科学与技术》，177**，114542。https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114542 Islas, J. F., 等（2020）。印楝（印楝）及其潜力概述。《功能食品杂志》，74，104171。Judée, F., Simon, S., Bailly, C., & Dufour, T.（2018）。使用介质阻挡放电活化自来水以用于农学应用：长寿命化学物种的鉴定与定量。《水研究》，133，47-59。Li, G., Xu, J., Zhou, Y., & He, Z.（2023）。用于可持续表面灭菌和液体活化的滑动弧等离子体。《**等离子体化学与等离子体处理》，43**，725–744。https://doi.org/10.1007/s11090-023-10331-9 Li, S., 等（2023）。交流脉冲模式运行下用于氮氧化物合成的滑动弧反应器。《ACS可持续化学与工程》，11(34)，12821-12832。Li, X., Zhao, Y., & Wang, Z.（2021）。植物酚类化合物的稳定性挑战及增强策略。《植物化学杂志》，184，112659。Marcinauskas, L., Uscila, R., & Aikas, M.（2025）。用于水活化的大气压滑动弧等离子体发射特性表征。《**物理学杂志D：应用物理》，58**，125205。https://doi.org/10.1088/1361-6463/ad16b1 Nawaz, A., Huque, R., Rahman, M., & Rahman, S. M.（2022）。等离子体活化水中的活性物种及其在抗菌活性中的作用。《**ACS应用生物材料》，5**，3980– 3990。https://doi.org/10.1021/acsabm.2c00065 NILSSON, S., 等（2024）。利用三维断层成像和单次荧光寿命成像对滑动弧放电进行全面分析。《通信工程》，3，103。Oliveira, M., 等（2022）。等离子体活化水：推动食品工业创新的前沿技术。《Food Research international》，156，111368。Patra, J. K., Das, G., Fraceto, L. F., 等（2022）。冷等离子体在食品加工与保鲜中的应用：机制见解与安全考量。 **Trends in Food Science &**

Pérez, M. 等（2023）。Folin–
Ciocalteu 法测定总酚含量背后的化学原理。《Antioxidants》，
12(7)。

Pisheh, F. Z. 等（2023）。等离子体活化水与
迷迭香提取物联用对抗菌活性的影响。《**Food Microbiology**》，
113，104239。https://doi.org/10.1016/j.fm.2023.104239

Pisheh, M. H.、Esfahani, R. A. 和 Mahmoudi, M.（2023）。
等离子体活化水对草本提取物酚类谱及微生物负荷的影响。
《**Food Research International**》，**167**，112655。
https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112655

Pradhan, D., 等（2022年）。关于
罗勒属的植物化学与分子药理学综述。《South African Journal
of Botany》，150，342-360。

Punthi, F., 等（2023年）。提取方案优化
使用等离子体活化水提取生物活性物质。《Foods》，12(23),
4347。

Rahman, M., Hasan, M. S., Islam, R., Rana, R., Sayem, A.,
Sad, M. A. A., 和 Matin, A.（2022年）。等离子体活化水在食品安全与
品质方面的应用：近期进展综述。《International Journal of
Environmental Research and Public Health》，19(11)，6630。

Rotondo, A., Dellino, M., 和 Gherardi, M.（2025年）。
等离子体活化水在液相放电过程中的酸化动力学。 **Plasma Processes
and Polymers,** **22**,e2400025. https://doi.org/10.1002/ppap.202400025

Roy, N. C., Hafez, M. G., & Talukder, M. R. (2016).
用于产生OH和O自由基的大气压H2O/O2滑动弧等离子体
表征。AIP会议论文集 / arXiv预印本。

Roy, N., Hafez, M. M., & Talukder, M. M. (2018). 等离子体-
液体相互作用及滑动弧中活性物种的生成。 **Plasma Sources Science
and Technology,** **27**,085010. https://doi.org/10.1088/1361-6595/aad6b4

Thirumdas, R., Sarangapani, C., & Cullen, P. J. (2018).
食品加工中的等离子体活化水：现状与展望。 **Trends in Food Science &
Technology,** **77**,21–31. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.05.002

Zhang, Q., Chen, Q., Li, B., & Ma, R. (2023年). 提升
等离子体处理的草本浸泡液的抗氧化和抗菌活性。 **Food
Chemistry,** **405**,
134962.https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134962

Zhao, L., Chen, J., & Liu, Y. (2019年). 储存条件下黄酮类化合物的
降解动力学。Food Chemistry, 280, 183–190.