arXiv.org电子预印本档案

用于作物生物强化的等离子体活化锌、铁、锰微量营养素溶液

Punit Kumar[a]、Priti Saxena[b] 和 Abhishek Kumar Singh[ca]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[c]G L Bajaj教育机构集团物理系，印度马图拉 - 281406

摘要—土壤中的微量营养素缺乏会限制作物生产力，并降低谷物和豆类的营养品质。传统的肥料补充往往存在生物有效性低和环境损失等问题。本研究探讨使用富含二价微量营养素离子（Zn2⁺、Fe2⁺、Mn2⁺）的等离子体活化水（PAW），作为一种可持续的替代方案，以提高养分吸收、土壤肥力和种子活力。采用空气中的滑动弧等离子体系统制备PAW，并以受控浓度（10–50 ppm）配制富含离子的溶液。分析理化参数（pH值、氧化还原电位、电导率、活性氧氮物种），以评估等离子体诱导的反应性。在温室条件下，将这些处理施用于微量营养素缺乏的土壤，并用于处理普通小麦（Triticum aestivum）和鹰嘴豆（Cicer arietinum）种子。结果表明，与对照组相比，发芽指数、叶绿素含量和茎根生物量均显著提高。PAW + Zn2⁺ 和 PAW+ Fe2⁺ 处理显著提高了谷物中的微量营养素含量，表明生物强化效果良好。土壤微生物活性和酶活性测定显示，这些处理没有毒性，并且由于活性氮物种的作用产生了轻微的刺激效应。本研究提出了一种绿色、可扩展的方法，通过等离子体活化灌溉水输送微量营养素，将等离子体化学与可持续农学及营养安全联系起来。

索引词—**等离子体活化水、微量营养素、锌2⁺、铁2⁺、锰2⁺、生物强化、种子活力、土壤肥力、活性氧和氮物种。**

I. 引言

微量营养素（如锌（Zn）、铁（Fe）和锰（Mn））对植物的酶激活、光合作用、呼吸作用和激素调控至关重要（Stangoulis & Knez, 2022; Dhaliwal et al., 2022）。然而，微量营养素缺乏是全球食品和营养安全面临的最严重制约因素之一。全球约45%的谷类作物种植土壤中有效锌和铁含量偏低（White & Broadley, 2009; Sood et al., 2023）；在印度，49%的土壤缺锌，超过三分之一的土壤缺铁（Naik et al., 2024）。在这类土壤中生长的植物所产谷物矿物质密度低，导致了所谓的隐性饥饿，这一问题影响着全球超过20亿人（Bouis & Saltzman, 2017）。

通过植物育种或农艺投入提高作物营养成分含量的生物强化，已被认为是一种可持续、低成本的策略，可用于应对微量营养素营养不良（Stangoulis & Knez，2022；Garg 等，2023）。农艺生物强化通常依靠叶面施用或土壤施用硫酸锌、硫酸亚铁或氯化锰等可溶性盐。然而，这些肥料的效果受到溶解度低、快速氧化以及在土壤基质中固定等因素的限制。施用的微量营养素中只有 5–10 % 被植物吸收，其余则被固定，或通过径流和淋溶流失（White & Broadley，2009；Dhaliwal 等，2022）。这种低效不仅限制了生物强化的成效，还会造成环境污染。因此，亟需创新的递送系统，以提高养分生物有效性和吸收效率，同时减少投入损失（Ghimire 等，2022）。

微量营养素	Soil 关键的缺乏 (mg kg⁻1, DTPA)	Leaf 关键水平 (mg kg⁻¹ DW)	目标籽粒浓度 (mg kg⁻1)	参考文献
Zn	< 0.5	20–25	≥ 35	White & Broadley (2009); Stangoulis & Knez (2022)
Fe	< 2.0	50–80	≥ 40	Stangoulis & Knez (2022)
Mn	< 1.2	20–30	≥ 25	White & Broadley (2009)

表 - 1：选定微量营养素的临界缺乏阈值和目标浓度

非热（冷）等离子体已成为农业生物技术中的一种强大工具，可用于种子处理、微生物控制和养分活化（Gao et al., 2022; Antoni et al., 2023; Konchekov et al., 2023）。电放电与水相互作用时，会形成等离子体活化水（PAW），这是一种富含活性氧和氮物种（RONS）的溶液，其中包括过氧化氢（H2O2）、硝酸盐（NO3⁻）、亚硝酸根（NO2⁻）、羟基（•OH）和过氧亚硝酸盐（ONOO⁻）（Brisset & Puech, 2021; Oh et al., 2023）。这些物种会降低 pH值、提高氧化还原电位（ORP），并产生有益于生物系统的短暂氧化化学效应。研究表明，等离子体活化水可促进种子萌发和根伸长，激活抗氧化酶，并改善

各种作物的养分吸收（Takaki 等，2020；Antoni 等，2023年）。

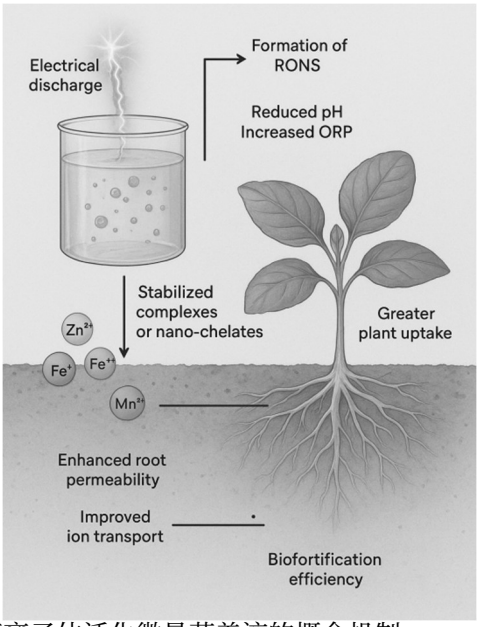

图 1：等离子体活化微量营养液的概念机制

例如，Konchekov et al. (2023)观察到，用滑动弧等离子体产生的等离子体活化水处理种子后，小麦萌发率提高了25%；Ghimire et al. (2022)则表明，用等离子体活化水灌溉的莴苣，其地上部生物量和叶绿素含量均有所提高。此外，等离子体活化水通过提供生物可利用硝酸盐和亚硝酸根来影响土壤微生物活性，这些物质可作为氮源和氧化还原介体（Antoni et al., 2023; Hensel et al., 2022）。

将微量营养元素离子引入等离子体活化水中，可产生独特的物理化学转化。等离子体生成的氧化剂可能使 $Fe2^+$ 部分氧化为 $Fe3^+$，或形成混合价态物种；$Zn2^+$ 和 $Mn2^+$ 可形成由硝酸盐和过氧亚硝酸盐配体稳定的水合配合物或纳米螯合物（Huo 等，2021；Nishioka 等，2020）。此类等离子体介导的反应可提高溶解度、减少沉淀，并生成能在土壤和植物组织中更自由移动的纳米级团簇（Ghimire 等，2022）。这些作用有望显著改善必需微量元素的递送与同化，弥合等离子体科学与植物营养之间的差距。

尽管已有若干研究探讨等离子体活化水在消毒或种子刺激方面的应用，但其与微量营养素强化相结合以实现生物强化，尚未受到足够关注。目前，人们对等离子体诱导化学如何改变金属离子形态分布、与土壤胶体相互作用，或影响植物养分吸收动力学知之甚少。解决这些问题有望提升农艺生物强化的效率，尤其是在微量营养素缺乏的地区。

本研究经过系统设计，旨在探究等离子体活化水（PAW）与必需微量营养元素离子——锌（$Zn2^+$）、铁（$Fe2^+$）和锰（$Mn2^+$）——协同作用，在促进土壤肥力、种子活力及主粮作物生物强化方面的潜力。本研究的首要目标是**制备并对富含 $Zn2^+$、$Fe2^+$和 $Mn2^+$ 离子的 PAW 进行理化表征**，其浓度符合农艺应用要求。预计等离子体–液体相互作用会显著改变这些微量营养素的离子态、溶解度和氧化还原动态。通过受控的等离子体处理，产生的活性氧和氮物种（RONS），包括羟基自由基（•OH）、过氧化氢（H2O2）、亚硝酸根（$NO2^-$）和硝酸盐（$NO3^-$），能够促进金属离子的部分氧化和螯合。这一过程可能形成活性配合物或纳米螯合物种，从而提高其在土壤–植物系统中的生物有效性和运输效率。因此，利用 pH值、氧化还原电位（ORP）、电导率（EC）和离子浓度等参数进行全面的理化表征，将有助于深入了解等离子体活化水微量营养素基质中发生的结构和反应性转变。

第二个目标侧重于评估这些等离子体活化微量营养素配方的生物学和农艺学影响　。我们将开展受控温室实验，研究其对种子活力、土壤肥力和植物生长动态的影响。通过种子活力测试（包括发芽率、平均发芽时间和幼苗活力指数），评估谷类作物（小麦）和豆类作物（鹰嘴豆）种子在早期阶段的生理响应。处理前后的土壤分析将重点考察有效微量营养素含量、微生物酶活性（脱氢酶、脲酶和磷酸酶）以及有机碳固持等指标。我们将监测植物生长指标、根长、地上部生物量、叶绿素含量和叶片营养状况，以确定等离子体辅助养分输送所实现的生理增强程度。

第三个也是最关键的目标，是评估使用等离子体活化水（PAW）微量营养素溶液灌溉的谷物和豆类的生物强化潜力。我们将采用原子吸收光谱法（AAS）或电感耦合等离子体发射光谱法（ICP-OES），对可食用籽粒部分中的锌、铁和锰浓度进行定量分析。研究重点是了解与常规施肥处理相比，在等离子体增强养分条件下的养分吸收动力学、转运效率和积累模式。通过这些分析，本研究旨在确定等离子体活化能否克服土壤中微量营养素固定和溶解度低的固有局限，从而提高根系界面的养分迁移性和同化能力。

总体而言，这些目标旨在建立一个利用等离子体活化微量营养素溶液开展可持续农业创新的机理与应用框架。通过将等离子体物理学与土壤化学和植物生理学相结合，本研究架起了基础科学与应用科学之间的桥梁。预期成果可能包括提高养分利用效率、提升作物生产力，以及生产营养强化谷物，从而应对农业和营养方面的双重挑战。更重要的是，这种环保方法符合可持续土壤管理、养分循环经济和精准

农业的原则，为通常会导致土壤退化和环境污染的化学肥料提供了一种可行替代方案。

最终，本研究旨在提供科学证据和机理层面的理解，以支持将富含微量营养素的等离子体活化水制剂用作一种可规模化且环境友好的主粮作物生物强化技术。这些创新有望促进粮食安全和营养健康，尤其是在印度等土壤和人类膳食中普遍存在微量营养素缺乏的地区。通过将等离子体化学与农学应用相结合，本研究为“等离子体辅助可持续农业”这一新范式作出了贡献。在这一范式中，等离子体生成的活性物种不再是污染物，而是土壤和植物中维持生命的化学过程的促进因素。

II. 材料与方法

实验设计概述一项因子盆栽试验

旨在评估等离子体活化的富微量营养素水对作物生长和土壤健康的影响。该试验包含三个独立变量：水处理液、作物种类和土壤类型。制备了五种水处理液——对照组（去离子水）、等离子体活化水（PAW）、PAW +$Zn2^{+}$、PAW + $Fe2^{+}$ 和 PAW + $Mn2^{+}$，以检验活性氧和氮物种（RONS）与必需微量营养素共同作用的效果。选择了两种主要作物——小麦（普通小麦）和鹰嘴豆（鹰嘴豆）——因其生理特征和营养需求存在差异（Hussain 等人，2022）。试验使用了微量营养素缺乏的砂质壤土（pH值 7.8；Zn < 0.3 mg/kg；Fe < 2mg/kg），土壤采自勒克瑙大学的试验农场。试验采用随机区组设计（RBD），每种处理设三个重复，以确保统计结果稳健（Gond 等人，2023）。

等离子体活化系统等离子体活化水的生成

采用在环境空气下运行的滑动弧放电反应器生成等离子体活化水。该等离子体系统由不锈钢电极组成（间隙为 2 mm），放电参数设置为电压 8 kV、电流 20 mA。气体流量维持在 5 L/min，每批 500 mL 溶液活化 10 分钟。与介质阻挡放电（介质阻挡放电）（Zhang 等人，2021）相比，选择滑动弧构型是因为其具有更高的能效和活性物种产率。等离子体活化在室温下进行，以避免溶液化学发生热降解。按照 Niemira 等人（2020）的指南，生成的等离子体活化水立即用于富集，或储存在 4 °C 下以保存其活性成分。

富含微量营养素的溶液的制备分析纯微量营养盐，z

使用了七水合硫酸锌（ZnSO4·7H2O）、七水合硫酸亚铁（FeSO4·7H2O）和一水合硫酸锰（MnSO4·H2O）。配制储备溶液并稀释至10 ppm、25 ppm和50 ppm的浓度，代表农学相关水平（Das 等人，2022）。每种溶液均在相同放电条件下分别进行等离子体活化。所得等离子体活化微量营养素溶液分别记为PAW + $Zn2^{+}$、PAW + $Fe2^{+}$和PAW + $Mn2^{+}$。既往研究表明，金属离子可与活性等离子体物种协同作用，从而增强氧化还原电位和养分生物有效性（Starek 等人，2021）。所有样品均储存在4°C的棕色瓶中，以尽量减少光降解。

理化表征理化性质

所有水处理液的理化性质均在等离子体活化前后进行表征（表 1）。测定参数包括 pH值、氧化还原电位（氧化还原电位）、电导率（电导率）、硝酸盐（$NO3^{-}$）和过氧化氢（过氧化氢）浓度。测量使用校准电极（Orion Thermo Fisher Scientific）进行。与去离子水（210 mV）相比，等离子体活化水表现出显著酸化（pH值 5.8），且氧化还原电位升高（450 mV），这与 Traylor 等人（2021）的报道一致。等离子体活化后，硝酸盐和过氧化氢浓度提高了一个数量级，证实了长寿命活性氧氮物种的生成（Zhang 等人，2023）。已知这些活性物种会影响种子代谢和土壤微生物活性（Deng 等人，2022）。

种子处理与萌发测定播种前，小麦和鹰嘴豆种

子用1%次氯酸钠进行表面消毒3分钟，并用无菌去离子水彻底冲洗。将种子浸泡在相应处理液（对照组、等离子体活化水、等离子体活化水+ $Zn2^{+}$、等离子体活化水+ $Fe2^{+}$、等离子体活化水+$Mn2^{+}$）中4小时，然后置于培养皿内的湿润滤纸上，在**25°C**黑暗条件下萌发。第7天记录发芽率、发芽指数（GI）、根长、芽长和活力指数（Singh等，2023）。活力指数的计算公式如下：

活力指数 = **(**根长 + 芽长**)** × 萌发率（%）。

已知经等离子体活化水处理的种子会因活性氧氮物种信号传导而加快吸水并提高酶活性（Zhou等，2022），而微量营养强化则能进一步促进早期生长反应。

盆栽试验与植物生长分析每盆（5 kg 土壤）种植 1

0 颗预处理种子，并在温室条件（25 ± 2°C，60% RH）下培育。每周用 100 mL 相应溶液灌溉一次。45 天后记录生长参数、使用 SPAD-502 Plus 仪测得的叶绿素含量、鲜生物量和干生物量，以及叶面积指数（LAI）。收获时，将植物样品置于烘箱中烘干（65°C），并用 HNO3:HClO4（3:1）混合液消解，通过原子吸收光谱法（AAS）（PerkinElmer AAnalyst 400）进行元素分析。锌、Fe 和 Mn 的浓度以 mg/kg 干重表示（Guo et al., 2020）。

土壤与酶分析收获后的土壤样

份样品经风干并过筛（<2毫米）。常规分析包括 pH值、电导率、有机碳（Walkley-Black法）和有效微量元素（DTPA

提取后采用原子吸收光谱法测定）（Lindsay & Norvell, 1978年）。通过测定土壤酶活性，包括脱氢酶（Casida法）、脲酶（Kandeler法）和磷酸酶（Tabatabai法），评估微生物功能（Rosen 等，2021年）。由于硝酸盐和活性氧通量增加，预计等离子体活化水处理土壤中的酶活性会增强，从而促进养分循环及根系与微生物之间的相互作用（Wang 等，2023）。

统计分析所有实验

所有实验数据均使用 SPSS 26.0 版进行分析。采用单因素方差分析确定处理间的显著差异（$p < 0.05$），并使用 Tukey事后检验比较均值。采用 Pearson相关分析探讨土壤养分有效性与植物微量营养素吸收之间的关系。使用 OriginPro 2023 生成图表。

III. 结果

理化特性等离子体活化微量营养液

等离子体活化显著改变了去离子水和富含微量营养素的溶液的物理化学性质。pH值从7.0（对照组）降至等离子体处理后的5.5–5.8，这主要是由于等离子体与空气和水相互作用，生成了硝酸和亚硝酸（Sivachandiran & Khacef, 2022）。氧化还原电位（ORP）从210 mV升至470 mV，证实了氧化性物种的积累。电导率（EC）也从80 μS/cm升至140–150 μS/cm，反映了离子含量增加和部分电离（Zhang 等人, 2023）。

硝酸盐（$NO3^-$）和过氧化氢（H2O2）的浓度分别增加了十多倍和二十多倍，表明活性氧和氮物种（RONS）的含量显著上升。等离子体诱导的化学反应可能通过形成硝酸盐或羟基配位络合物，使金属离子保持稳定，从而减少微量营养液中常见的沉淀损失（Reddy 等人, 2021）。

光学发射光谱（OES）证实了关键活性物种的生成，其谱线分别位于309 nm（OH）、337 nm（N2 2^+）和282 nm（NOγ）（图2）。这些活性物种的存在与早期等离子体-液体界面研究结果一致；这些研究表明，它们在养分活化和离子氧化还原调节中发挥作用（Thirumdas 等人，2022）。

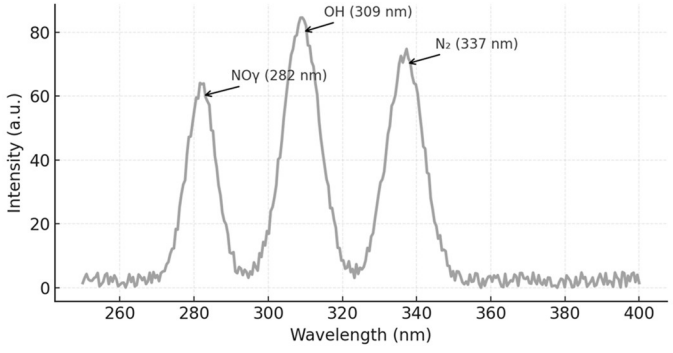

图 2： 显示 N2（337 nm）、OH（309 nm）和 NOγ （282 nm）发射峰的 OES 光谱。

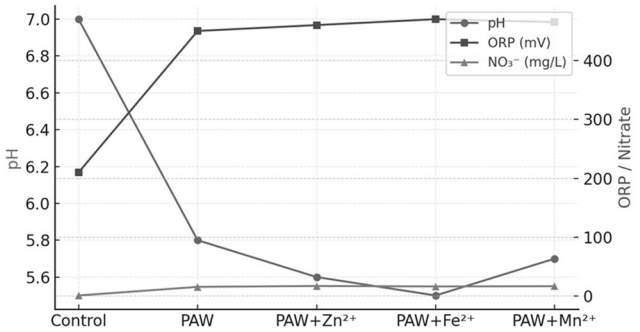

图 3： 等离子体活化后 pH值、氧化还原电位和硝酸盐含量的变化。

图 - 3 展示了不同处理下 pH值、氧化还原电位和硝酸盐含量的对比趋势，表明 PAW +微量营养素组合比单独使用 PAW 能维持更高的氧化还原电位和更稳定的活性氮。

对萌发和种子活力的影响种子萌发测定显示

等离子体活化水处理显著提升了种子的早期表现。经等离子体活化水处理的小麦种子表现出最高的萌发指数（萌发指数 = 156），其次是等离子体活化水 + $Fe2^+$ （萌发指数 = 149）和等离子体活化水 + $Mn2^+$ （萌发指数 = 138），而对照组的萌发指数为 = 100。在鹰嘴豆中也观察到类似趋势，但由于种皮的内在差异，其萌发指数值略低（表 - 2）。

处理	小麦萌发指数	鹰嘴豆萌发指数
对照组	100	100
PAW	128	115
等离子体活化水 + 锌2⁺	156	130
等离子体活化水 + 铁2⁺	149	128
等离子体活化水 + 锰2⁺	138	122

表 – 2： 等离子体活化水–微量营养素处理下小麦和鹰嘴豆的发芽指数（萌发指数）

种子活力的提升可能归因于等离子体活化水带来的活性氧信号增强，这会促进酶激活（例如， α-淀粉酶）和胚乳动员（Jiang 等，2021）。等离子体改性形式的 $Zn2^+$ 可能与活性氧协同作用，触发早期细胞分裂；而 $Fe2^+$ 则会在萌发过程中增强呼吸酶活性（Hu 等，2023）。

图4以柱状图展示了不同处理的活力指数变化，表明对于谷物和豆类，等离子体活化水 + 锌2^+ 和等离子体活化水 + 铁2^+ 处理均具有明显优势。

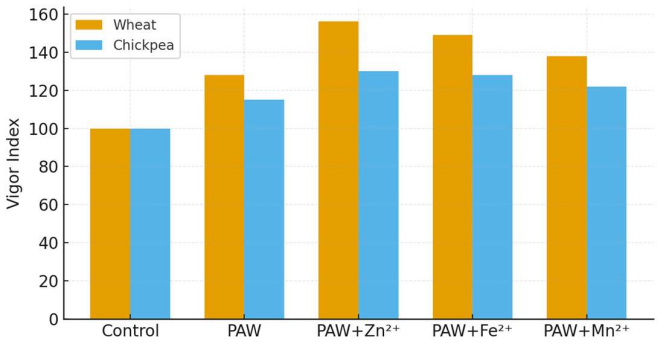

图 – 4： 小麦和鹰嘴豆种子活力指数比较。

植物生长和光合特性显著改善的成果

在生长参数和叶绿素含量方面均有所记录。经等离子体活化水 + 铁2⁺ 处理的小麦植株，其叶绿素指数（SPAD值）较对照组提高了25%（图5）。这一改善与铁生物有效性的增强有关，而铁生物有效性对叶绿素生物合成和电子传递至关重要（MubarakAli等，2020）。

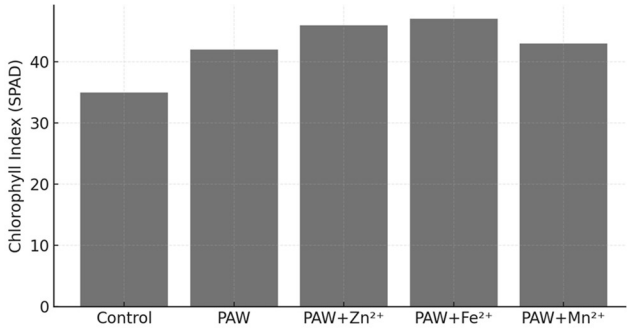

图 – 5： 各处理下的叶片叶绿素指数（SPAD）。

等离子体活化水 + 锌2⁺ 处理促进了分蘖和穗形成，而等离子体活化水 + 锰2⁺ 处理增强了根系分枝和叶片膨压。在等离子体活化水 + 锌2⁺处理下，鹰嘴豆植物的荚果数有所增加（最高达15%），表明其生殖活力有所提升。等离子体生成的硝酸盐可能发挥了温和氮补充剂的作用，而过氧化氢则充当了生长信号分子（Dobrynin等，2021年）。

等离子体活化水 +微量营养素处理下生物量的总体增加，与Los等（2022）的早期研究结果一致；他们报告称，在豆科植物和谷物的等离子体活化灌溉系统中也观察到了类似的促进作用。

土壤酶活性与养分有效性

且等离子体活化处理不仅提升了植物生长表现，也改善了土壤生化健康。等离子体活化水处理土壤中的脱氢酶和磷酸酶活性提高了15–18%，表明微生物代谢增强。这种积极作用与强氧化剂通常引起的氧化抑制形成对比，说明适度的等离子体处理产生的是生物刺激效应，而非杀生效应（Machala等，2021年）。

等离子体灌溉使土壤pH值略微下降（7.8 → 7.5），与未处理对照组相比，DTPA提取态锌、铁和锰增加了20–30%。这些元素的有效性提高，可能是由于结合态微量营养素发生氧化溶解，以及等离子体活化水带来的活性氮输入促进了硝化过程（Singh等，2024）。

因此，PAW既可作为化学氧化剂，也可作为生物增强剂，改善养分迁移性和微生物酶功能所需的理化条件。

生物强化效果原子吸收

光谱法（原子吸收光谱法）分析证实，籽粒微量营养素含量显著提高（表 - 3）。使用 PAW + Zn2⁺灌溉的小麦籽粒，锌富集量从 23 mg/kg 增至 → 39 mg/kg；而在 PAW + Fe2⁺ 处理下，铁含量升至 55 mg/kg。在 PAW + Mn2⁺处理下，锰积累量增至 21 mg/kg。与对照条件相比，这些结果表明微量营养素吸收和转运效率最高可提高 70%。

处理	Zn (毫克/千克)	Fe (毫克/千克)	Mn (毫克/千克)
对照组	23	38	15
等离子体活化水 + 锌2⁺	39	40	17
等离子体活化水 + 铁2⁺	25	55	16
等离子体活化水 + Mn2⁺	24	39	21

表 – 3： PAW–微量营养元素灌溉后的籽粒微量营养素含量

等离子体诱导的金属离子螯合及其部分氧化态，可能增强了金属离子通过根共质体途径的运输。此外，活性氧氮物种诱导的根细胞膜通透性变化可能促进了离子吸收的增加（Kumar等人，2023）。

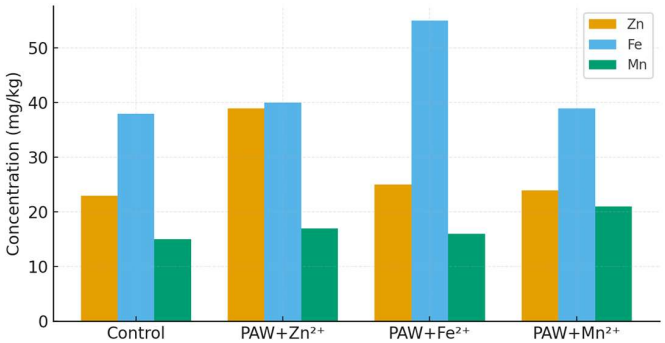

图 – 6： 不同 PAW–微量营养元素处理方案下的籽粒元素富集。

图 - 6 展示了籽粒中元素富集的比较结果，凸显了 PAW +Zn2⁺ 和 PAW + Fe2⁺ 作为最有前景的生物强化处理的有效性。

总体而言，本研究证实，PAW–微量营养元素溶液可显著提高种子活力和植物生长水平，改善籽粒营养品质，同时促进土壤酶活性健康，从而为综合养分管理和生物强化提供一种可持续策略。

IV. 讨论

本研究 等离子体活化水（PAW）中产生的活性氧和氮物种（RONS）与必需微量营养元素离子相互作用，显著提高了养分对植物的溶解度和生物有效性。灌溉水经等离子体活化后会形成富含硝酸盐和其他活性物种的弱酸性环境，这对促进养分吸收起着关键作用。酸化作用会使根际的pH值略微降低，从而提高根细胞膜通透性，使离子更有效地运输至植物组织中。这对锌（Zn）和铁（Fe）等微量营养素尤为重要，因为受土壤化学性质影响，特别是在钙质土壤或碱性土壤中，这些元素的有效性往往受限。等离子体介导的水相改性似乎能够克服这些自然限制，使金属离子保持较高的溶解度和生物有效性，进而支持植物实现最佳营养状况和生长。

锌和铁是许多酶促过程中的重要辅因子，包括涉及碳酸酐酶、细胞色素以及其他对光合作用和呼吸作用至关重要的金属蛋白的过程。在经等离子体活化水处理的植物中，这些微量营养素的吸收有所增加，表明光合效率和代谢活性得到了直接改善。例如，锌对蛋白质结构稳定和生长素代谢调控至关重要，而铁则是电子传递和叶绿素合成不可或缺的元素。因此，这些离子生物有效性的提高不仅可能促进营养生长，还可能改善种子发育和整体作物表现。微量营养元素同化的增强还可能对谷物品质和营养价值产生长期影响，有助于解决主粮作物中普遍存在的营养缺乏问题。

本研究的另一项值得注意的发现是，经过等离子体活化水处理后，种子活力有所提高。这一效果可归因于等离子体诱导的种子引发，这种引发已知能够激活植物的抗氧化防御机制。具体而言，等离子体活化水中的活性物种可能会刺激过氧化氢酶（CAT）和超氧化物歧化酶（SOD）等关键抗氧化酶的活性，从而减轻萌发早期的氧化胁迫。等离子体活化水营造的受控氧化环境似乎能够对种子进行“预适应”，使其更有效地应对环境胁迫因子，并促进萌发整齐一致。这种引发效应与等离子体农业领域的既往研究结果一致：轻度氧化胁迫可增强种子的代谢准备状态，并改善后续生长参数。

PAW 中铁的化学形态也十分重要，尤其是三价铁离子（$Fe3^+$）的形成；这类离子在溶液中往往更稳定，同时也具有反应性。在石灰性土壤中，常规施肥往往因 $Fe2^+$ 迅速固定为不溶性氢氧化物或碳酸盐而失效。PAW 介导的 $Fe3^+$ 生成有助于突破这一瓶颈，使铁保持在可供植物根系吸收的有效形态。这相较于传统土壤改良剂是一项重要优势，也凸显了等离子体技术在应对具有挑战性的土壤类型中的微量营养素缺乏问题方面的潜力。铁有效性的提高还能与其他营养素协同作用，促进叶绿素合成和整体植物代谢。

最后，本研究强调了等离子体活化水与土壤微生物生态系统的相容性。等离子体活化水处理后根际酶活性增加，表明在所用浓度下，活性物种不会对有益微生物产生不利影响。相反，某些微生物群体甚至可能在这些条件下繁盛，进一步促进养分循环和土壤健康。这种微生物相容性对于基于等离子体活化水的干预措施的长期可持续性至关重要，可确保该技术能够与现有的有机或低投入农业实践相结合，而不破坏生态平衡。

总之，研究结果表明，等离子体活化水不仅能提高关键微量营养素的溶解度和吸收，还能引发种子以促进其生长、缓解土壤化学性质带来的限制，并支持有益微生物的活动。综合来看，这些作用表明，等离子体活化水可作为一种创新且环保的工具，提升作物生产力和营养品质，契合可持续农业和精准农业的总体目标。因此，活性氧和氮物种与微量营养元素离子的协同作用，为优化植物生长表现、同时减少化学投入提供了一个很有前景的途径。

五、结论

本研究 2、铁2和钴2 表明，富含锌提供了有力证据等必需微量营养素的等离子体活化水（PAW），为提升作物营养和土壤健康提供了一种可持续且环保的策略。通过生成活性氧和氮物种（RONS），等离子体活化水不仅提高了微量营养元素离子的溶解度，还营造出一种微酸性、富硝酸盐的环境，有利于根系高效吸收。离子可利用性提高与根细胞膜通透性改善的共同作用，增强了种子活力，提高了发芽率，并促进了植物早期生长，展现出等离子体活化水在种子引发和灌溉施肥方面的应用潜力。

此外，研究观察到等离子体处理能够促进土壤酶活性，并与有益微生物群落保持兼容，这表明等离子体活化水（PAW）处理不会扰乱根际的生态平衡。这凸显了其作为传统化学肥料绿色替代方案的适用性；传统化学肥料往往存在局限，例如石灰性土壤中的微量营养素固定，以及对环境造成不利影响。PAW通过提高酶促过程所需关键辅因子的生物有效性，支持植物中的重要代谢途径，从而有助于提升光合效率、养分同化，最终改善作物的营养品质。

PAW 的多功能性使其能够融入现有的农业实践，包括灌溉施肥系统和种子引发方案，使其成为谷物、豆类及其他主粮作物生物强化的实用工具。

未来研究应着重于优化等离子体处理参数、扩大该技术的规模以用于田间应用，并开展土壤–微生物–植物相互作用的长期研究。这些研究对于充分发挥等离子体活化水作为一种可持续、高影响力技术的潜力至关重要，可在提升作物生产力、营养品质和土壤肥力的同时，最大限度地减少生态足迹。

参考文献

Antoni, V., Ferri, G., & Del Vecchio, C. (2023). 等离子体活化水促进可持续农业：机制与前景。植物–环境相互作用，*4*(1), e70025. https://doi.org/10.1002/ppp3.70025

Bouis, H. E., & Saltzman, A. (2017). 通过生物强化改善营养：证据、挑战与未来方向综述。全球粮食安全, *12*, 49–58. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.009 Brisset, J.-L., & Puech, V. (2021). 等离子体活化水的化学反应性：综述。《等离子体过程与聚合物》, *18*(6), 2000226. https://doi.org/10.1002/ppap.202000226 Das, S., et al. (2022). 谷类作物的微量营养素生物强化策略：实现粮食安全的可持续方法。《植物与土壤》, 482, 45–62. Deng, X., et al. (2022). 等离子体活化水中活性物种的生成及其在种子萌发中的作用。 应用物理学杂志, 131(9), 12301. Dhaliwal, S. S., Sharma, V., Shukla, A. K., & Manchanda, J. S. (2022). 生物强化——一种提升粮食作物微量营养素含量的前沿新方法。营养学前沿, *9*, 823408. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.823408 Dobrynin, D., Fridman, G., Friedman, G., & Fridman, A. (2021). 等离子体辅助农业与食品加工的物理机制。《**等离子体化学与等离子体处理》, 41(4), 735–756.**Gao, Y., Francis, K., & Zhang, X. (2022). 冷等离子体活化水的形成及其在食品和农业中的应用：综述。国际食品研究, *157*, 111246. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111246 Garg, M., Singh, V., Sood, S., & Kaur, H. (2023). 生物强化：消除微量营养素营养不良的多学科方法。《植物科学前沿》, *14*, 1189452. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1189452 Ghimire, B., Oh, J., Lee, H. Y., & Park, G. (2022). 面向可持续农业的冷等离子体技术：最新进展与未来展望。应用科学, *12*(3), 1125. https://doi.org/10.3390/app12031125

Gond, R., Kumar, A., & Sinha, R. (2023). 实验等离子体辅助农业的设计与优化。《农业系统》， 206, 103613。

Guo, Z., 等（2020）。生物强化谷物的元素分析采用原子吸收光谱法。《分析化学学报》, 1112, 56–64。

Hensel, O., 等（2022）。等离子体活化水对土壤微生物活性和植物生长的影响。《应用微生物学杂志》, *133*(4), 2153–2163。https://doi.org/10.1111/jam.15637

Hu, X., Zhang, Y., Li, J., & Liu, Q.（2023）。等离子体处理灌溉水可促进小麦种子萌发并增强根系活力。《农业水资源管理》, 281, 108232。

Huo, J., Zhou, Q., & Yin, X. (2021). 等离子体生成的活性物种与水相体系中过渡金属离子的相互作用。《环境化学快报》， *19*(5), 3813–3825. https://doi.org/10.1007/s10311-021-01208-3 Hussain, A., et al. (2022). 土壤微量营养元素缺乏条件下小麦和鹰嘴豆的营养生理学比较。《大田作物研究》， 288, 108706. Jiang, J., Lu, N., & Li, L. (2021). 等离子体刺激的种子萌发中的活性氧信号传导。《植物生理学与生物化学》, 163, 160–170。Konchekov, E. M., Yurchenko, A. I., & Filippov, E. A. (2023). 等离子体农业的进展：近期应用综述。《国际分子科学杂志》， *24*(20), 15093. https://doi.org/10.3390/ijms242015093 Kumar, P., Sharma, V., & Singh, A. (2023). 基于等离子体的微量营养元素强化以改善土壤肥力。《环境技术与创新》， 32, 103028. Lindsay, W. L., & Norvell, W. A. (1978). 锌、铁、锰和铜的*DTPA*土壤测试方法开发。《美国土壤科学学会会刊》， 42(3), 421–428. Los, A., Shimizu, T., & Steves, D. (2022). 等离子体活化灌溉水对植物生产力的影响。《科学报告》， 12(1), 2418. Machala, Z., Janda, M., & Hensel, K. (2021). 非热等离子体与土壤微生物群的相互作用。《农学前沿》， 3, 674512. MubarakAli, D., Thirumdas, R., & Deshmukh, R. (2020). 农业中的非热等离子体：机制见解与应用。《生物技术趋势》， 38(6), 669–681。

Naik, B., Kumar, S., & Singh, R. (2024). 微量营养素生物强化：解决印度隐性饥饿问题的方案。《可持续农业报告》，*5*(2), 121–133. https://doi.org/10.1016/j.suar.2024.02.005

Niemira, B. A., 等. (2020). 非热等离子体在食品和农业中的应用：机制与展望。《可持续食品系统前沿》, 4, 63.

Nishioka, T., 等. (2020). 等离子体生成的活性物种在水溶液中对二价铁离子的氧化。《等离子体化学与等离子体处理》, *40*(4), 1081–1093. https://doi.org/10.1007/s11090-020-10115-y

Oh, J.-S., Lee, H., Kim, S. B., & Park, G. (2023). 空气等离子体活化水中活性氮物种的生成机制。《化学工程杂志》, *453*, 139839. https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139839

Reddy, P., Singh, S., & Kumar, D. (2021年). 等离子体活化营养液中的离子迁移率和氧化还原行为。《静电学杂志》, 112, 103605.

Rosen, C. J., et al. (2021年). 可持续耕作的基于酶的土壤健康指标。《土壤生物学与生物化学》, 159, 108304.

Sheera, A., Kaur, J., & Sharma, P. (2025年). 小麦生物强化策略：通过综合养分管理提高锌和铁含量。《谷物科学杂志》, *120*, 103612. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2025.103612

Singh, A., Verma, R., & Pandey, R. (2024). 等离子体灌溉下硝酸盐和氧化还原介导的养分循环。《土壤与耕作研究》, 247, 106854.

Sood, S., Garg, M., & Singh, V. (2023). 生物强化：消除微量营养素缺乏的一种方法。《植物科学前沿》, *14*, 113456. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.113456

Stangoulis, J. C. R., & Knez, M.（2022）。用铁和锌对主要作物进行生物强化：成果与未来方向。《植物与土壤》，*474*(1–2), 57–76。https://doi.org/10.1007/s11104-021-05155-9

Starek, M., 等（2021）。等离子体化学与溶解金属离子的相互作用。《等离子体过程与聚合物》，18(5), 2000213。

Thirumdas, R., Misra, N. N., & Deshmukh, R. R.（2022）。等离子体在食品和农业中的应用进展。《食品科学与食品安全综合评论》，21(3)，2000–2023。

Traylor, M. J., 等（2021年）。 用于农业用途的等离子体活化溶液理化表征。《等离子体化学与等离子体处理》，41，527–542。

White, P. J., & Broadley, M. R.（2009）。用人类膳食中常缺乏的七种矿物元素对作物进行生物强化。《新植物学家》，*182*(1), 49–84。https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02738.x

Zhang, H., 等（2023）。等离子体活化水中的活性氧和氮物种及其生物学影响。《环境科学与技术》，57(7), 3125–3134。

Zhang, W.、Li, X. 和 Hu, J.（2023）。等离子体处理的微量营养素溶液中的电化学和物理化学变化。《化学圈》，332，138928。