

增氧灌溉与氮素耦合作用对红壤区玉米氮肥利用的影响

汪 春¹, 王宏轩^{2*}, 于珍珍³, 李海亮², 孙海天², 赵云龙⁴

1. 山东协和学院计算机学院, 山东济南 250109; 2. 中国热带农业科学院亚热带作物研究所, 广东湛江 524000;
3. 广东海洋大学机械工程学院, 广东湛江 524088; 4. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 黑龙江大庆 163000

摘 要: 红壤质地黏重、酸化板结、水气失调等障碍制约了作物产能提升, 为探讨增氧灌溉与施氮量耦合作用对红壤区玉米产量及水氮利用效率的影响, 本研究基于 2021—2024 年连续 4 a 的田间定位试验, 以惠玉甜 3 号为试验对象, 结合增氧灌溉技术, 设置不施氮 (CK)、低氮 (N1, 150 kg/hm²)、中氮 (N2, 300 kg/hm²) 与高氮 (N3, 450 kg/hm²) 4 个处理, 测定不同氮肥水平下增氧灌溉技术对土壤理化性质、玉米氮肥利用效率及产量的影响。结果表明: 增氧灌溉配施氮肥可显著改善耕层 (0–40 cm) 的土壤容重, 以 N2 和 N3 处理效果较优, 平均土壤容重分别较 CK 显著降低 3.87% 和 5.23%, 土壤总孔隙度分别显著提高 5.40% 和 6.27%。在 N2 处理下, 土壤贮水量较 CK 显著提高。施氮可提高耕层土壤有机碳和全氮含量, 土壤碳氮比随施氮量的增加而降低, 有效促进了土壤微生物的生长, 特别是细菌生物量的积累, 以 N2 处理效果较好。增氧灌溉条件下施氮肥能够改善玉米产量性状, 以 N2 效果最佳, 平均较 CK 显著增产 63.7%。对玉米产量与增氧灌溉条件下施氮量关系进行拟合发现, 施氮量为 250~350 kg/hm² 时, 可使玉米籽粒产量最高; N1 和 N2 处理下氮肥农学效率 (4.50~25.10 kg/kg) 和氮肥利用率 (30.1%~41.9%) 较高。综上, 从氮肥用量减施、玉米丰产和氮肥高效利用角度考虑, 施纯氮量 250~350 kg/hm² 可改善广东红壤区增氧灌溉条件下土壤理化性质, 增强土壤蓄水能力, 对提高玉米产量和氮利用效果较好。该研究结果可为中国南方黏性红壤通气性改良提供理论依据和可行途径。

关键词: 增氧灌溉; 玉米; 红壤区; 氮肥利用效率; 回归分析

中图分类号: S274; S154.1 文献标志码: A

Effects of Aerated Irrigation and Nitrogen Coupling on Nitrogen Fertilizer Utilization of Maize in Red Soil Areas

WANG Chun¹, WANG Hongxuan^{2*}, YU Zhenzhen³, LI Hailiang², SUN Haitian², ZHAO Yunlong⁴

1. School of Computer Science, Shandong Xiehe University, Jinan, Shandong 250109, China; 2. South Subtropical Crops Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang, Guangdong 524000, China; 3. School of Mechanical Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang, Guangdong 524088, China; 4. Engineering College, Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163000, China

Abstract: The heavy texture, acidification, compaction and water-air imbalance of red soils constrain crop yield enhancement. To investigate the combined effects of aerated irrigation and nitrogen application on maize yield and water-nitrogen use efficiency in red soil regions, this study employed a four-year (2021—2024) field-based design using Huiyu Sweet 3 corn as the test variety. Four treatments were established: no nitrogen application (CK), low nitrogen (N1, 150 kg/hm²), medium nitrogen (N2, 300 kg/hm²), and high nitrogen (N3, 450 kg/hm²) treatments. The study measured the effects of aerated irrigation technology on soil physicochemical properties, maize nitrogen use efficiency, and yield under different nitrogen fertilizer levels. Results indicated that aerated irrigation combined with nitrogen fertilization significantly improved soil bulk density in the plow layer (0–40 cm), with N2 and N3 treatments showing superior ef-

收稿日期 2025-09-04; 接受日期 2025-10-12

基金项目 海南省自然科学基金青年基金项目 (No. 325QN434); 广东海洋大学科研启动项目 (No. 060302062313)。

作者简介 汪 春 (1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农业工程与信息技术。*通信作者 (Corresponding author): 王宏轩 (WANG Hongxuan), E-mail: wanghongxuan@catas.cn。

fects. Average soil bulk density decreased significantly by 3.87% and 5.23% compared to CK, respectively, while total soil porosity increased significantly by 5.40% and 6.27%, respectively. Under the N2 treatment, soil water storage capacity significantly increased compared to CK. Nitrogen application elevated soil organic carbon and total nitrogen content in the plow layer. The soil carbon-to-nitrogen ratio decreased with increasing nitrogen application rates, effectively promoting soil microbial growth, particularly bacterial biomass accumulation, with N2 treatment yielding the best results. Under aerated irrigation conditions, nitrogen fertilization improved maize yield traits, with N2 yielding the best results, achieving a significant average yield increase of 63.7% compared to CK. Fitting the relationship between maize yield and nitrogen application rate under aerated irrigation revealed that grain yield peaked at nitrogen application rates of 250–350 kg/hm². The agronomic efficiency (4.50–25.10 kg/kg) and nitrogen use efficiency (30.1%–41.9%) were higher under N1 and N2 treatments. In summary, considering nitrogen fertilizer reduction, corn yield maximization, and efficient nitrogen utilization, applying 250–350 kg/hm² of pure nitrogen improves soil physicochemical properties and enhances water retention capacity under aerated irrigation in Guangdong's red soil regions, effectively boosting corn yield and nitrogen utilization. These findings provide theoretical support and practical pathways for improving the aeration of clayey red soils in southern China.

Keywords: aerated irrigation; corn; red soil region; nitrogen fertilizer utilization efficiency; regression analysis

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.01.022

红壤广泛分布于我国长江以南的低山丘陵区, 具有质地黏重、酸化板结、水气失衡、保水保肥性能差等典型特性^[1]。玉米作为红壤区重要的粮食作物和饲料来源, 种植户在市场需求和经济利益的驱使下, 为增加产量而过量施用氮肥或采用不合理的灌溉方式, 导致土壤板结加剧、孔隙度降低、水气失衡, 同时氮素易于淋失或积累, 进而造成氮肥利用率低^[2-4]。即使采用高效的灌溉方式, 过量灌水亦可能排挤土壤气体, 造成根区缺氧, 使作物生长受限、产量下降、品质降低, 从而制约该区域玉米的生产潜力。

充足的土壤氧气可以促进氮的矿化和硝化过程, 增强硝态氮的有效性与作物对氮素的吸收效率^[5-7]。增氧灌溉是在传统渗灌系统的基础上, 利用通气系统(如罗茨风机)或微纳米增氧泡发生系统, 将空气或者含氧物质通过埋设于地下渗灌管道输送到作物的根区, 实现水分与氧气协同供应, 改善土壤通气性^[8], 提高土壤微生物的活性和酶的活性^[9-10], 加速有机质的分解和氮素的矿化过程, 提高氮肥的利用效率^[11-14], 增加土壤中养分的有效性。有研究证实^[15-16], 通过对不同灌水量和灌水方式的试验得出, 降低灌溉水量, 采取控制灌溉和浅层灌水方式可提高土壤氮素的矿化效率, 减少氮肥损失并降低 N₂O 的排放量。关于增氧灌溉提高土壤理化性质方面的研究已有诸多报道。BHATTARAI 等^[17]认为, 增氧灌溉能够显著地改善作物根区缺氧的状况, 提高根区通气性, 是提高产量的

有效管理措施, 进一步减少氮肥的施用。ABUARAB 等^[18]研究指出, 增氧灌溉能够在不显著增加成本的情况下改善根系土壤中缺乏空气的情况。此外, 研究表明, 增氧灌溉还能促进土壤硝化反应, 减少氮损失, 提高氮利用率, 有助于作物的生长和发展^[19-25]。

综上, 红壤土壤通气性差、氮肥利用率低的问题日益受到关注, 改善土壤通气性与优化施氮管理的技术不断创新, 水气调控效果和氮素利用效率逐步提升。但是大部分现有研究缺乏长期试验数据, 南方红壤区玉米水氮利用对增氧灌溉与不同施氮量耦合的响应规律仍不明确, 无法全面评估增氧灌溉在不同施肥水平下对土壤性质和作物生长的综合影响, 因此本研究的目的是通过增氧灌溉与合理施氮的结合, 提高作物的氮肥利用效率和水分利用效率, 最终达到减少氮肥投入、提高作物产量的效果。鉴于此, 本研究在国家土壤质量湛江观测实验站, 开展为期 4 a 的田间定位试验, 系统评价不同氮肥水平下增氧灌溉对玉米产量、水氮利用效率及氮肥效率类指标的响应机制, 以期为该地区增氧灌溉条件下合理的水氮投入提供理论依据, 有望为现代农业提供一种高效、环保和可持续的生产技术。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

于 2021—2024 年在广东省湛江市中国热带农业科学院国家土壤质量湛江观测实验站

(109°31'E, 21°35'N) 进行, 该区位于广东省南部湛江市, 地势平坦, 降雨量充沛且集中, 夏季多雨湿热, 冬季温暖干燥, 具备典型的热带和亚热带气候特征, 年平均日照时数为 1900~2100 h, 年平均降雨量为 1620 mm, 全年无霜期大于 350 d, 年平均气温为 23.5 °C。供试土壤为玉米田原状红壤土, 2021 年 6 月试验初始时耕层土壤 (0~40 cm) 有机碳含量为 5.8 g/kg, 碱解氮为 58.7 mg/kg, 有效磷为 14.1 mg/kg, 速效钾为 138.0 mg/kg, pH 5.4, 土壤容重为 1.62 g/cm³。研究区域内小型气象站自动获取并记录试验期间降雨、气温及其他环境因素 (图 1)。

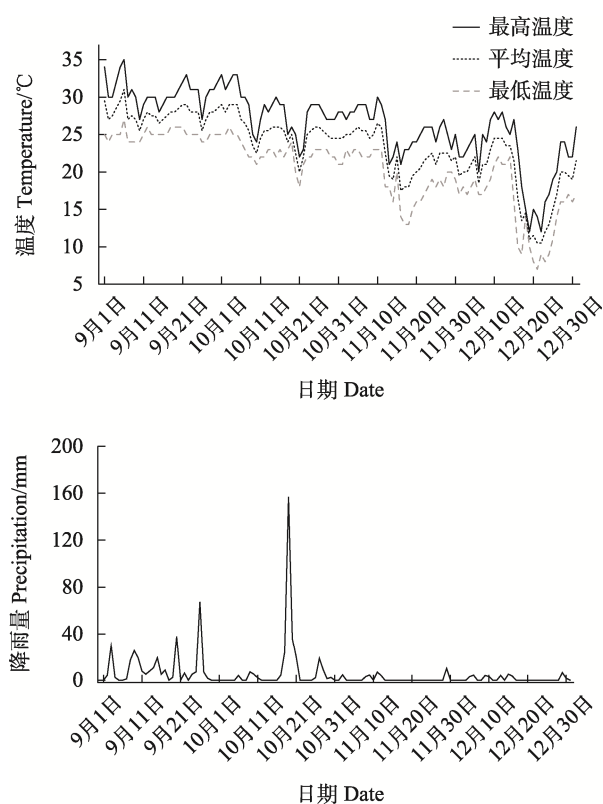


图 1 2021—2024 年试验期内平均空气温度和降雨量
Fig. 1 Average air temperature and precipitation during the 2021—2024 experimental period

1.2 试验设计

试验采用单因素随机区组设计, 在增氧灌溉条件下设置 4 个氮肥处理: 不施氮作为对照 (CK), 以及 150 kg/hm² (N1)、300 kg/hm² (N2) 和 450 kg/hm² (N3) 3 个施氮水平。每个处理重复 3 次, 每个小区面积为 12.5 m², 在每一个区内, 4 个处理 (CK、N1、N2、N3) 均随机排列, 避免人为因素导致系统性偏差。为避免水肥在小区间横向交换, 小区之间设置宽为 1.0 m 缓冲带,

地下滴灌主管按区布置, 每小区单独引出支管+独立截止阀+流量计 (精度±2%), 滴灌带末端安装止回阀与端塞以防回流与串流, 注肥时仅开启目标小区阀门, 其他小区阀门保持关闭, 注肥完成后以清水冲洗 10~15 min。氮肥施用水平的设定参考了湛江红壤区秋玉米的氮肥需求特征, 并结合当地气候与土壤条件加以优化。由于该地区降雨集中且气候温暖湿润, 土壤有机质分解速度较快, 氮素易发生转化与损失, 因此在设计中选取 300 kg/hm² 作为中等施氮水平, 旨在兼顾作物需求与氮素利用效率。为了形成梯度对比, 探讨增氧灌溉条件下不同施氮用量对红壤土理化性质及其玉米产量和氮肥利用效率的影响, 设置纯氮中间量减半倍处理 (150 kg/hm²) 和中间量加半倍处理 (450 kg/hm²), 低施氮水平主要考察是否存在氮肥不足对土壤性质改善和产量形成的限制作用, 与此同时, 高氮投入可以模拟农户可能存在的偏高施肥水平, 以分析氮肥过量是否会导致氮素利用率下降、资源浪费或土壤环境风险。

玉米整个生育周期灌水或降雨后进行增氧灌溉 1 次, 不采取增氧滴灌时自然状态下灌溉水溶解氧为 4~5 mg/L, 采用微纳米气泡机 (XZCP-K, 云南夏之春环保科技有限公司, 1.5 kW, 气泡粒径 0.2~4.0 μm, 气泡发生量 3.0~3.5 m³/h), 使灌溉水能达到的饱和溶解氧为 14~15 mg/L。

本地区在夏季高温多雨的条件下容易受到病虫害的侵袭^[26-27]。每年 9 月到次年 1 月的气候特点是温度适中, 不会出现过高或过低的极端温度, 此外, 这段时间的降水量均匀, 有利于玉米的正常发育, 所以本研究玉米种植均选择该时间段, 不仅能满足玉米的生长需求, 还可以保证试验结果的可靠性和科学性, 供试品种为惠玉甜 3 号, 玉米种植参数如图 2 所示, 种植密度为 1.44 万株/hm², 分别于 2021 年 9 月 3 日、2022 年 9 月 1 日、2023 年 9 月 5 日和 2024 年 9 月 2 日进行播种, 于 2022 年 1 月 10 日、2023 年 1 月 8 日、2024 年 1 月 7 日和 2025 年 1 月 8 日收获玉米。玉米苗期~拔节期 (VE~V6)、拔节期~抽雄期 (V6~VT)、抽雄期~灌浆期 (VT~R2) 和灌浆期~成熟期 (R2~R5) 降水量、灌水量和追施氮肥量 (尿素 N 质量分数 ≥46%) 如图 3 所示。

玉米灌溉方式为渗灌, 氮肥量 (纯氮) 以水肥一体化的形式进行施入, 试验期间采用人工除

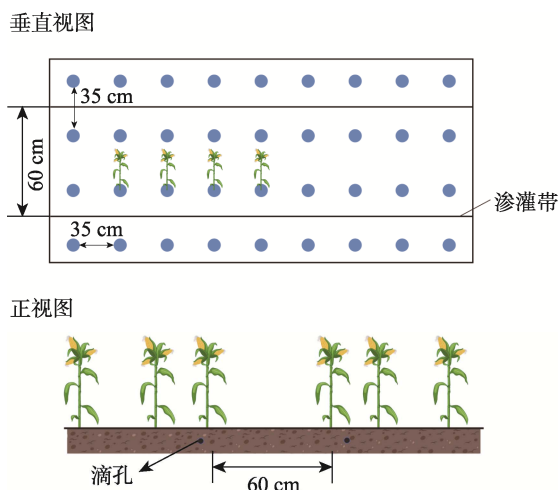


图 2 增氧灌溉下玉米种植模式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of maize planting patterns under aerated irrigation

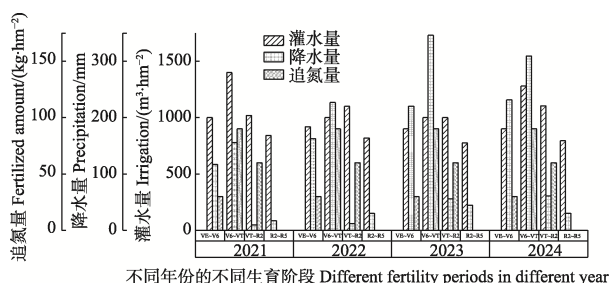


图 3 玉米不同生育阶段降水、灌水和追肥情况

Fig. 3 Precipitation, irrigation and fertilizer at different fertility periods of maize

草的方式。试验的灌溉量采用作物-蒸发皿系数法确定, 利用 E601 蒸发皿测量的蒸发量来控制灌水量。灌溉时间为 08:00–12:00 或 16:00–18:00, 灌溉周期为 3~4 d。灌溉水量的计算公式^[28]: $W = A \cdot E_p \cdot K_p$, 式中, W 表示每处理每次灌溉量 (L), A 为单个滴头所控制的面积, 为 0.12 m² (0.35 m×0.35 m), E_p 为 2 次灌溉间隔期间由蒸发皿测得的蒸发量 (mm), K_p 为作物-蒸发皿系数, 玉米 VE~V6 阶段为 0.6, 在 V6~VT 阶段为 0.8, 在 VT~R2 阶段为 1.0, 在 R2~R5 阶段为 0.8^[29], 在大田条件下, 实际灌溉量为公式计算值扣除有效降水量后确定。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 土壤物理性质 (1) 土壤容重和土壤总孔隙度。2021 年 6 月试验开始前及玉米收获后, 利用环刀采集 0~20、20~40 cm 层原状土, 测定 0~40 cm 耕层土壤容重, 取其平均值, 并计算耕层土壤孔隙度 (K), 计算公式: $K = (1 - \gamma / 2.65) \times 100$,

式中, K 为土壤总孔隙度 (%); γ 为土壤容重 (g/cm³); 2.65 为土壤比质量近似值 (g/cm³)。

(2) 土壤贮水量。在玉米 4 个生育时期, 分别采用土钻取土干燥法测定 0~100 cm 层土壤质量含水率 (%), 每 20 cm 层取 1 个样, 计算土壤贮水量, 计算公式: $W = 10 \times h \times \gamma \times a$, 式中, W 为土壤贮水量 (mm), h 为土壤深度 (cm), γ 为土壤容重 (g/cm³), a 为土壤质量含水量 (%)。1.3.2 土壤化学性质 (1) 土壤养分。2021 年 6 月试验处理前及玉米收获期后, 于各处理小区内随机选择 3 个采样点, 从 0~40 cm 耕层按 20 cm 间隔分层取土样, 混合后测定土壤有机碳 (重铬酸钾氧化法)、全氮 (凯氏定氮法)、碱解氮 (碱解扩散法)、有效磷 (钼锑抗比色法) 和速效钾 (火焰光度法) 的平均含量^[30]。

(2) 土壤细菌生物量。采用“S”型多点取样法在耕作层的 0~10 cm、10~20 cm 和 20~30 cm 深度进行取样, 取样时先去除石块、植物残体等杂质, 再分层充分混合后获得新鲜土样。每个试验小区共选取 5 个采样点进行土壤样品采集, 土壤细菌生物量采用平板计数法进行测定^[5, 31]。

(3) 玉米产量。于玉米成熟期在各小区选取 2 m×2 m 样方, 统计收获穗数后, 将果穗风干后脱粒测定穗粒质量和百粒质量后称取质量测产 (玉米籽粒含水率按 14% 计算)。氮肥农学效率 (kg/kg) = (施氮处理产量 - 不施氮处理产量) / 施氮量; 氮肥利用率 = (施肥处理区作物吸氮总量 - 不施氮处理作物吸氮总量) / 所施肥料中氮素总量 × 100%^[32]。

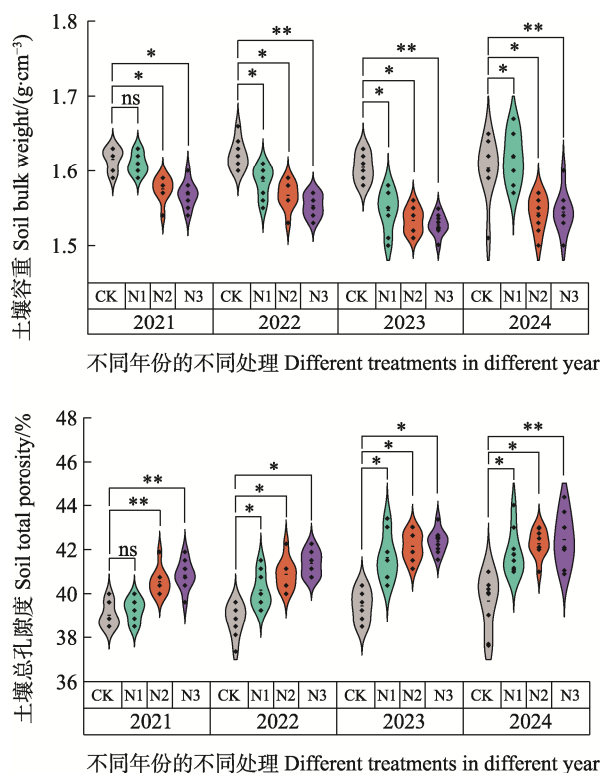
1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2020 软件绘制图表, 使用 SPSS 22.0 软件进行显著性分析, 用平均值±标准误差表示测定结果 (附表 1)。相关性分析采用 Pearson 法, 使用 Origin 2022 软件作图, 采用多元回归分析方法对玉米籽粒产量与施氮量之间的关系进行拟合。

2 结果与分析

2.1 土壤物理性质

2.1.1 土壤容重及土壤总孔隙度 增氧灌溉配施氮肥对玉米收获期耕层土壤容重有显著影响 (图 4)。试验处理前 (2021 年 6 月), 土壤质地较



*表示同一年份不同处理间差异显著 ($P<0.05$)；**表示同一年份不同处理间差异极显著 ($P<0.01$)；ns 表示同一年份不同处理间无显著差异。

* indicates significant difference between different treatments in the same year ($P<0.05$); ** indicates extremely significant difference between different treatments in the same year ($P<0.01$); ns indicates no significant difference between different treatments in the same year.

图 4 增氧灌溉配施氮肥对土壤容重和总孔隙度的影响

Fig. 4 Effect of aerated irrigation with nitrogen fertilizer on soil bulk weight and total porosity

为黏重，土层平均土壤容重为 1.62 g/cm^3 ，增氧灌溉技术通过优化土壤水气环境，促进微生物活动和优化水气平衡，为氮肥的有效传递和分布提供了理想条件，不同年份玉米收获时期各处理耕层平均土壤容重均随增氧灌溉年限和施氮量的增加而降低。2021 年，N2 处理和 N3 处理的土壤容重较 CK 分别降低 3.18% 和 3.84%，而 N1 处理与 CK 无显著差异。随着增氧灌溉年限的延长，增氧灌溉条件下各施氮处理土壤容重较 CK 均大幅度降低，在 2022 年和 2023 年，N1、N2、N3 处理平均土壤容重较 CK 分别显著降低 2.53%、3.85%、5.88% 和 3.90%、4.58%、5.26%。而 N3 处理尽管在 2021—2023 年容重持续降低，最低降至 1.53 g/cm^3 ，但在 2024 年回升至 1.54 g/cm^3 ，表明高氮条件下可能

因微生物活性受限或团聚体结构不稳定导致改善效果趋于平稳甚至回落，并且增氧灌溉和施氮肥的长期叠加作用对改善土壤结构具有累积效应^[33]。

增氧灌溉条件下配施氮肥各处理耕层土壤总孔隙度与土壤容重变化趋势相反，均随着增氧灌溉年限和施氮量的增加而增加，且中量 (N2) 和高量 (N3) 氮肥处理均显著高于 CK (图 4)。各处理耕层土壤总孔隙度在 37.36%~43.36% 之间，N1、N2、N3 处理较试验处理前 (38.04%) 提高 3.14%~11.36%。2021 年，N1、N2、N3 处理土壤总孔隙度较 CK 处理分别提高 0.64%、3.95% 和 4.72%，其中，N1 处理较 CK 无显著差异。2022 年和 2023 年，N1、N2、N3 处理土壤总孔隙度分别较 CK 显著提高 3.53%、5.36%、6.65% 和 5.69%、6.95%、7.51%，说明中、高氮肥量可促进更多的植物残体和根系分泌物在土壤中积累，提高微生物活性，微生物在分解有机质的过程中产生多糖类物质，这些物质可促进土壤颗粒团聚，进一步提高土壤的孔隙度。而 N2 与 N3 在 2023 和 2024 年差异不显著，但均高于 N1，表明中量施氮已达到促进孔隙度提升的阈值^[34]，超出此施氮量后，土壤结构改良的边际效应减弱，导致 N3 处理未能显著超过 N2 处理的效果。

2.1.2 土壤贮水量 由于玉米不同生育时期降雨量、灌水量及玉米耗水强度不同，土壤贮水量整体呈先快速降低后趋于稳定的变化趋势，玉米 VE~V6 时期植株较小，根系尚未完全发育，吸水深度较浅，对土壤中的水分消耗较少。与拔节期或灌浆期相比，苗期的玉米耗水强度较低。2021、2022 年 N1、N2、N3 处理土壤贮水量较 CK 分别提高 4.93%、12.83%、20.20% 和 5.16%、11.69%、9.12%，N1 和 CK 不存在显著性差异。2023、2024 年，N1、N2、N3 处理贮水量分别较 CK 提高 3.12%、5.94%、4.24% 和 2.97%、5.40%、3.69%，但是 N1 处理与 CK 不存在显著性差异 (图 5)，说明氮肥施用在一定程度上可改善土壤团聚体结构和孔隙度。

在玉米 V6~VT 时期，玉米耗水量增加，各处理土壤贮水量降至最低。2021 年，随着氮肥施用量的增加，各个处理土壤贮水量升高，保墒效果逐渐增强 (图 5)，N1、N2 和 N3 玉米贮水量

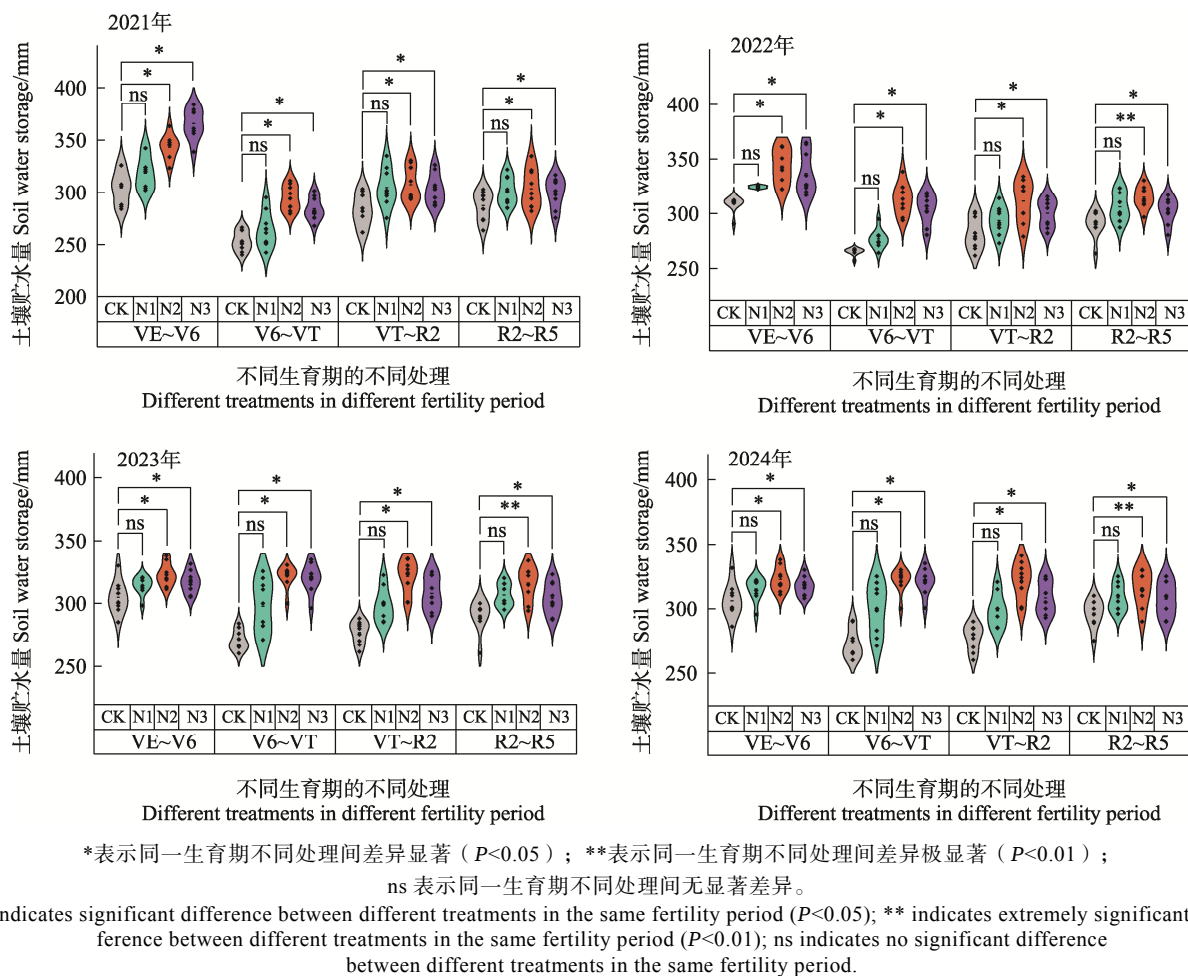


图 5 增氧灌溉配施氮肥对玉米不同生育时期土壤贮水量的影响

Fig. 5 Effect of aerated irrigation with nitrogen fertilizer on soil water storage at different fertility periods in maize

较 CK 分别显著提高 4.26%、16.60%和 12.41%，N1 与 CK 不存在显著性差异。2022、2024 年施氮各处理土壤贮水量同 2021 年变化基本一致。在玉米 VT~R2 时期，各处理土壤贮水量有所提高，而 N1 与 CK 差异不显著。2021、2022、2023、2024 年 N2 和 N3 处理土壤贮水量较 CK 分别显著提高 9.22%和 7.45%、10.43%和 6.45%、16.08%和 11.17%、16.03%和 11.16%。

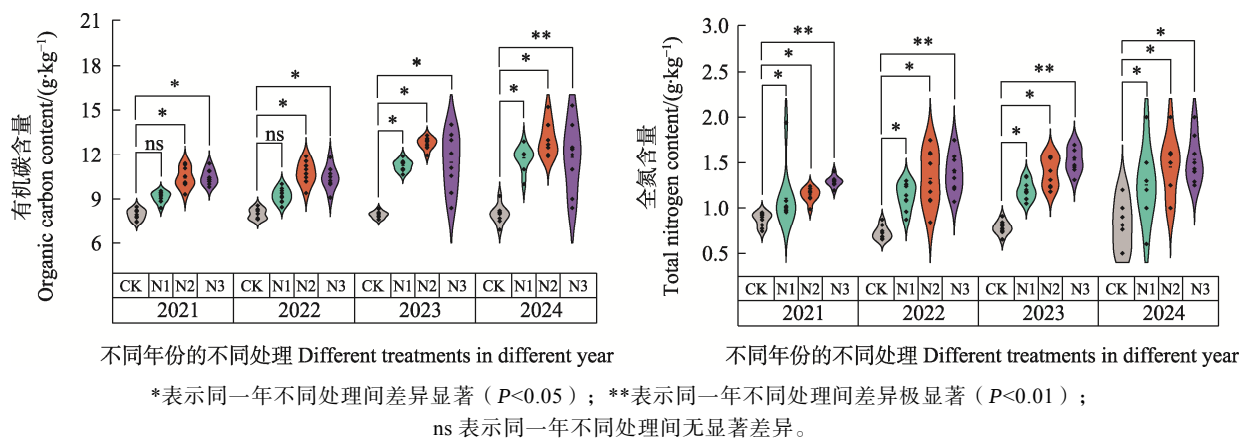
玉米进入 R2~R5 时期后，各处理的土壤贮水量有所增加，其中，N2 处理在此阶段的保水能力最为显著。在 2024 年 N1、N2 和 N3 处理的土壤贮水量与前 2 a 相比，继续保持较为相似的趋势，平均土壤贮水量较 CK 分别显著提高 5.55%、8.75%和 4.66% (图 5)。

综合 4 a 研究结果发现，在增氧灌溉田条件下，不同氮肥用量，与不施氮肥处理相比，可有效保蓄玉米整个生育期土壤贮水量，其中以 N2 处理效果最为显著，N3 处理次之，说明中量氮

肥 (N2) 可避免高量氮肥 (N3) 条件下玉米植株生长过旺，加剧水分的消耗。N1 虽有提升，但保水效果与 CK 无显著差异，说明较低的施氮量对玉米不同生育时期土壤水分的保持作用不显著。

2.2 土壤化学性质

2.2.1 有机碳、全氮含量 增氧灌溉配施氮肥可以增加耕层有机碳含量，不同年份玉米收获时期各处理土壤有机碳含量随着增氧灌溉年限和施氮量的增加而增加 (图 6)。2021、2022 年 N1、N2 和 N3 处理土壤有机碳含量较 CK 分别增加 14.86%、30.37%、31.00%和 15.38%、34.25%、30.37%，N1 与 CK 不存在显著性差异。2023 年和 2024 年 N1、N2 和 N3 处理下平均土壤有机碳含量较 CK 分别显著增加 40.75%、59.62%、43.62%和 48.05%、63.69%、48.79%。4 a 研究期间，N2 与 N3 处理间无显著差异，适当氮肥 (N2) 可促进土壤微生物活动，进而提高土壤有机碳的累积，



不同年份的不同处理 Different treatments in different year

不同年份的不同处理 Different treatments in different year

*表示同一年不同处理间差异显著 ($P<0.05$) ; **表示同一年不同处理间差异极显著 ($P<0.01$) ;

ns 表示同一年不同处理间无显著差异。

* indicates significant difference between different treatments in the same year ($P<0.05$); ** indicates extremely significant difference between different treatments in the same year ($P<0.01$); ns indicates no significant difference between different treatments in the same year.

图 6 增氧灌溉配施氮肥对土壤有机碳、氮含量的影响

Fig. 6 Effect of aerated irrigation with nitrogen fertilizer on the soil organic carbon and nitrogen content

但是在 N3 高氮处理下, 仅部分数据点高于 N2 处理, 但由于局部土壤异质性、氮肥引起的有机碳不稳定性以及自然条件的波动性, 有机碳平均值略低于 N2 处理。

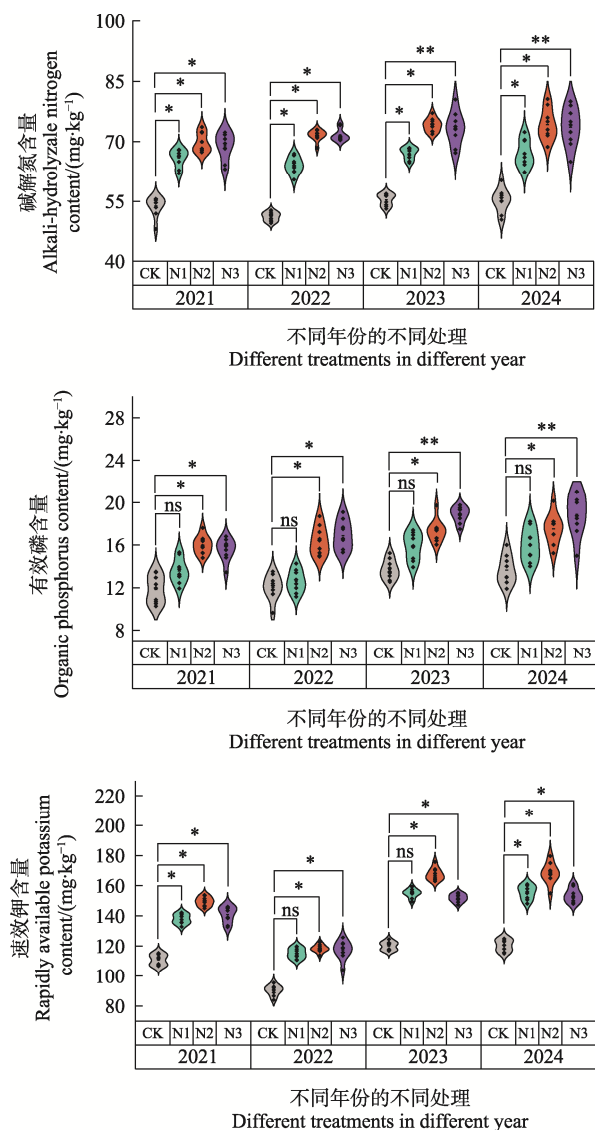
2021—2024 年土壤耕层全氮含量随增氧灌溉年限和施氮量的增加而增加 (图 6), 其中 2021、2023 年, N2 和 N3 的全氮含量虽有所增加, 但二者之间无显著差异。2024 年, N1、N2、N3 处理土壤有机碳含量较 CK 分别提高 52.56%、79.48%、96.15%, 说明持续的高氮输入促进了土壤氮的累积, 并减缓了氮素流失的影响, 并且随着增氧灌溉年限的延长, 高氮处理的效果逐渐积累, 进一步提高了全氮含量。

2.2.2 土壤速效养分含量 如图 7 所示, 不同增氧灌溉年限下玉米收获期各处理土壤速效养分含量在 2024 年最高。增氧灌溉技术通过提高土壤的氧气含量, 促进了微生物的活性和氮素的矿化过程, 增强了氮的转化速率^[27], 施氮条件下可显著增加土壤碱解氮含量 (图 7), 2021、2023、2024 年均以 N2 处理最高, 而 2022 年以 N3 处理最高, 但是与 N2 处理不存在显著性差异。N1、N2、N3 处理 4 a 平均值分别较 CK 显著增加 22.72%、34.18%、33.19%。2022、2023 年各处理有效磷含量均随施氮量的增加而增加, 以 N3 处理增幅最大, N2 处理次之 (图 7), 4 a 平均值分别较 CK 处理显著提高 31.26%、38.96%, 但是 N1 处理与 CK 差异不显著。2021 年施氮肥处理对土壤速效钾含量提升均有显著效果, N1、N2、N3 处理分别较 CK 显著提高 24.37%、34.78%、27.12%, 2022

年后, 施氮量对土壤速效钾含量的提升逐渐趋于稳定, N1 处理分别较 CK 显著提高 28.12%和 29.07%, N2 和 N3 处理在 2022 年和 2023 年表现出的增效作用减弱 (图 7), 处理之间不存在显著性差异。可见, 增氧灌溉技术与施氮的配合使用不仅增加了土壤的养分储备, 还可改善养分的可持续供给, 促进土壤的生物活性, 提高氮、磷和钾养分的利用效率, 这一作用在氮肥施用条件下表现尤为显著, 特别是在中量氮肥 (N2) 条件下, 养分供给的平衡性和持久性更为显著, 培肥效果较佳。

2.2.3 细菌生物量 不同处理下土壤细菌生物量变化范围为 $1.04 \times 10^9 \sim 5.40 \times 10^9$ 个/g, 2021—2024 年, 各处理细菌生物量整体上有逐年增加的趋势 (图 8), 说明逐年累积的氮肥输入促进土壤中细菌的生长和繁殖。试验初始阶段 (2021 年), 由于施氮量有限, 增氧灌溉的氧气供应未能完全释放微生物潜能, 因此 CK 的细菌生物量最低, 平均值为 2.41×10^9 个/g, N3 处理的细菌生物量最高 (3.89×10^9 个/g), 较 CK 提高 60.99%, 2022 年增氧灌溉配施氮肥累积效应逐渐增强, 与 2021 年相比, 低量施氮 (N1) 的细菌生物量保持稳定, 表明低量施氮可能已达效能上限。N2 和 N3 处理的细菌生物量增幅仍显著 (图 8), 与 CK 相比分别显著增加 60.10%和 78.85%。

2023 年增氧灌溉配施氮肥协同效应趋于平稳。CK 较 2022 年略有回升 (13.46%), 可能与自然条件改善有关, 但依然显著低于氮肥处理组。低量施氮 (N1) 在增氧灌溉的作用下略有增



*表示同一年不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) ; **表示同一年不同处理间差异极显著 ($P < 0.01$) ; ns 表示同一年不同处理间无显著差异。

* indicates significant difference between different treatments in the same year ($P < 0.05$); ** indicates extremely significant difference between different treatments in the same year ($P < 0.01$); ns indicates no significant difference between different treatments in the same year.

图 7 增氧灌溉配施氮肥对土壤速效养分含量的影响

Fig. 7 Effect of aerated irrigation with nitrogen fertilizer on soil quick-acting nutrient content

长,但效果趋于平稳,以 N2、N3 处理最佳,但是 N3 处理在 2023 年和 2024 年略微下降 (3.69×10^9 个/g),但是仍然高于其他处理,这种现象可能与高量氮肥持续输入导致的土壤微生物群落结构变化有关,说明在长期高氮条件下,由于氮肥过量导致微生物群落结构改变或部分微生物活性受抑,N3 处理因氮素过剩的边际效应减弱,效果趋于平稳。

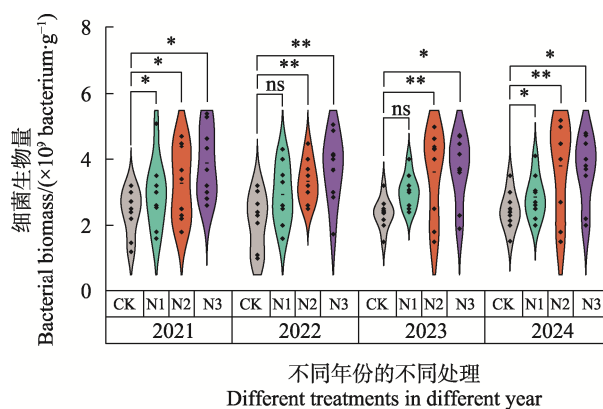


图 8 增氧灌溉配施氮肥对土壤细菌生物量的影响

Fig. 8 Effect of aerated irrigation with nitrogen fertilizer on soil bacterial biomass

2.3 玉米产量及氮肥利用效率

2.3.1 玉米产量性状 如图 9 所示,产量随施氮量呈“先增后减”规律,N2 (中等施氮水平) 最优,过量施氮 (接近/超过 N3 对应水平) 会降低产量,一方面是由于经过连续 3 a 较高水平的氮肥投入,土壤中可利用氮素逐渐积累,已满足甚至超过了作物生长所需的阈值。此时继续施加相同甚至更高水平的氮肥,其对产量的增益效应减弱,呈边际递减趋势,另外可能是由于 2024 年降雨偏少,并且出现了高温胁迫等,也会影响作物对氮素的响应程度,削弱施肥增产效应,特别是在高氮水平下,作物对环境波动更敏感,产量更易出现波动。

通过对 4 a 玉米籽粒产量与氮肥施用量进行曲线拟合可知,氮肥施用量 (X) 与玉米籽粒产量 (Y) 的回归方程结果表明,分别 $Y'=0$ (函数求导) 时, X 分别为 355.29、414.69、253.54 kg/hm^2 ,可获得最高玉米籽粒产量分别为 13 966.49、13 966.49、17 016.85 kg/hm^2 (图 9)。结合 4 a 增氧灌溉技术配施氮肥实际用量可知,在适度范围内,随着施氮量增加,玉米产量可稳定维持,但增幅有限,且高施氮量 ($414.69 \text{ kg}/\text{hm}^2$) 逐渐趋向饱和。建议氮肥施用量为 250~350 kg/hm^2 ,在此范围内,玉米产量接近最大值,同时避免因高施氮量导致的氮素浪费和产量增幅停滞。

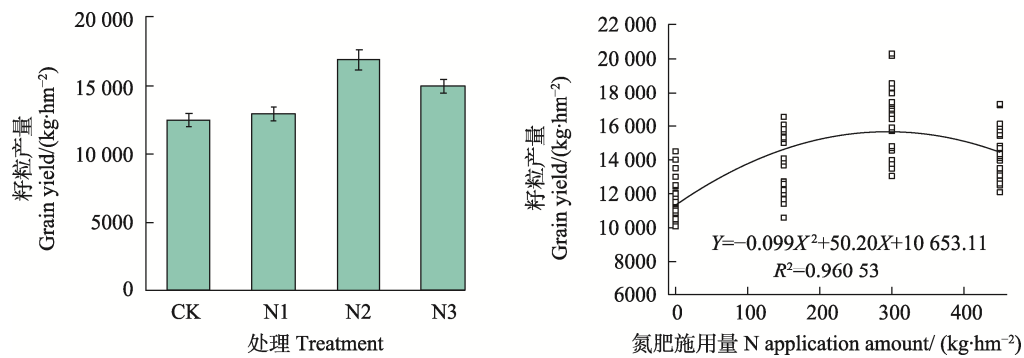


图 9 增氧灌溉配施氮肥对玉米籽粒产量的影响

Fig. 9 Effect of oxygen-enriched irrigation combined with nitrogen fertilization on corn grain yield

2.3.2 玉米氮肥利用效率 随施氮量的增加，各处理的氮肥农学效率 2021 年和 2022 年呈先增加后降低的变化趋势，而 2023 年呈下降趋势；2021 年和 2022 年 N2 处理氮肥农学效率最高；2023 年和 2024 年 N1 处理氮肥农学效率最高，N2 处理次之，均显著高于 N3 处理（表 1）。增氧灌溉条件下各处理的氮肥利用率随施氮量的变化与氮肥农学效率变化趋势基本一致，分析其原因可能由于低量和中量施氮条件下，氮素在作物体内的累积和分配更加合理，优先分

配至籽粒，而茎叶中氮素累积相对较低^[35]，高氮肥处理氮素优先分配至茎叶等营养器官，表现出抑制作物氮的积累，茎叶中富余的氮素可能通过蒸腾作用或脱落作用流失，导致氮肥利用率下降^[30]。综合 3 a 增氧灌溉田间试验可知，施低量和中量氮肥对提高玉米氮肥农学效率和氮肥利用率效果显著。

2.4 土壤理化性质相关性分析

对测定指标进行皮尔森相关性分析，结果如图 10 所示，红色代表正相关，蓝色代表负相关，数值越接近±1 表示相关性越强。在本研究中，土壤容重与土壤总孔隙度呈极显著负相关（ $r=-0.99$ ），相关研究均证实这一点^[7, 10, 36]，土壤容重反映了单位体积土壤干质量，土壤容重增加表示固体颗粒在单位体积中占据的比例提高，必然会挤占空气和水分通道，使大孔隙比例下降、总孔隙度减小，降低土壤通气性和渗水性。

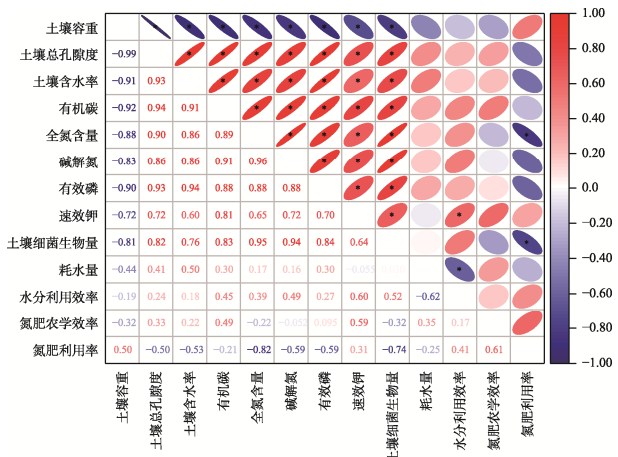
表 1 增氧灌溉配施氮肥对玉米氮利用效率的影响

Tab. 1 Effect of aerated irrigation with nitrogen fertilizer on nitrogen use efficiency of maize

年份 Year	处理 Treatment	氮肥农学效率 Nitrogen agronomic efficiency/(kg·kg ⁻¹)	氮肥利用率 Nitrogen use efficiency/%
2021	CK		
	N1	4.5±1.1 ^b	41.2±5.3 ^a
	N2	12.7±3.2 ^a	38.2±4.1 ^a
	N3	6.7±0.9 ^b	30.5±4.2 ^b
2022	CK		
	N1	7.1±0.3 ^a	34.6±6.2 ^a
	N2	8.6±2.4 ^a	30.1±3.7 ^a
	N3	2.7 1.9 ^b	23.7±2.4 ^b
2023	CK		
	N1	25.1±1.4 ^a	41.9±4.0 ^a
	N2	15.2±0.6 ^b	35.1±6.7 ^b
	N3	5.5±1.7 ^c	22.2±4.3 ^c
2024	CK		
	N1	18.5±2.3 ^a	40.1±4.7 ^a
	N2	16.8±1.6 ^a	33.6±3.1 ^a
	N3	4.0±1.2 ^b	20.4±2.5 ^b

注：同列不同小写字母表示同一年不同处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference in the same year among different treatments ($P<0.05$).



*表示显著相关（ $P<0.05$ ）。

* indicates significant correlation ($P<0.05$)

图 10 土壤理化性质相关性分析

Fig. 10 Correlation analysis of indicators

结合本研究试验结果^[37], 增氧灌溉与适宜施氮显著降低了土壤容重, 提高了总孔隙度, 尤其在 N2 处理下改善效果最为显著。这一改善促进了土壤有机碳($r=0.93$)、全氮($r=0.91$)和速效钾($r=0.84$)等养分的积累与转化, 进一步说明良好的孔隙结构有利于有机质积累和养分转化, 有助于微生物活性增强, 从而加速养分的矿化与释放, 提升土壤肥力。综上, 增氧灌溉和适宜施氮能够通过改善土壤结构(降低容重、增加孔隙度), 进而促进有机质积累和养分释放, 最终形成一个良性循环, 有效提升红壤区玉米的水氮利用效率和产量表现。

3 讨论

3.1 增氧灌溉配施氮肥对土壤物理性状的影响

土壤容重与孔隙度呈反比关系, 是评估土壤结构、通气性和水分保持能力的重要指标, 直接影响植物根系生长和土壤微生物活性^[33-34], 施氮肥可以促进植物根系的生长, 通过自身的机械力穿透土壤, 打破了原本较为紧实的土壤团粒结构, 增加土壤孔隙度。HUANG^[38]研究结果表明, 随着氮肥的增加, 土壤孔隙度有增加的趋势。本研究结果显示, 增氧灌溉技术配施氮肥不同用量均能有效降低耕层土壤容重, 增加土壤总孔隙度, 且氮肥施用量越高, 其改善效果越明显, 这与上述研究结果相近。分析其原因, 首先增氧灌溉能够改善土壤中的氧气供给, 增强土壤的通气性, 为细菌的生长和代谢提供了良好的环境条件, 进一步增加地下根系和土壤生物活动, 根系的周期性更新(如根系脱落和更新)在土壤中留下了空腔, 促进孔隙的形成, 降低耕层的土壤容重。其次, 在增氧灌溉技术条件下, 添加外源氮肥为微生物提供了充足的营养元素, 可以提高细菌生物量, 微生物群落中活跃的代谢活动随之增强, 分解产物中的多糖、有机酸能够与土壤颗粒结合, 向土壤提供大量分解物与土壤颗粒结合形成稳定的团粒结构, 这些作用共同促进了土壤颗粒间的结合力, 提高了土壤结构的稳定性, 从而使土壤容重进一步降低, 土壤总孔隙度增加。

土壤贮水量可以反映土壤在一定深度内能够存储、保持和供应水分的能力, 是判断土壤改良效果的重要参考指标。增氧灌溉技术结合施肥既有培肥改土的作用, 又有增强土壤蓄水保墒的能

力, 并且作物不同生育时期土壤蓄水保墒与氮素水平有密切关系。大量研究均表明合理施氮不仅可以通过改善土壤结构和增加孔隙度来提高土壤的持水能力, 还能通过促进根系生长和微生物活性增强土壤的保水效应。本研究结果表明, 增氧灌溉技术在中量氮肥(N2), 土壤水分的蓄积能力最为显著, 高量氮肥(N3)因作物生长过旺导致水分消耗增加, 从而降低保水效果^[35], 这一现象的本质在于氮肥水平与土壤水分平衡之间存在最佳匹配区间, 一方面, 高量施氮条件可以显著促进玉米地上部分的快速生长, 叶面积的显著增加进一步增强玉米的蒸腾作用, 导致更多的水分通过气孔散失。其次, 玉米旺盛生长对水分的需求高于土壤蓄水能力, 造成土壤水分消耗速度加快。于珍珍等^[9-10]在前期增氧灌溉田间试验中得出结论, 增氧灌溉技术能够显著改善土壤的氧气供给, 增强土壤呼吸速率, 促进细菌生物量的增加, 从而加速土壤有机质的分解与转化, 然而, 在高氮肥条件下, 这种作用可能会进一步刺激了土壤微生物的过度活跃, 消耗大量的有机质, 导致土壤团粒结构的分解, 破坏了有机质与矿物颗粒之间的结合, 导致土壤团聚体解体、孔隙结构塌陷, 有效储水孔隙比例下降, 同时, 微生物分解有机质过程中释放的生物热及氮素促进的植株旺盛生长会提高根际及表层土壤温度, 进而加速表层水分蒸发与非渗透性损失^[26], AZEEM 等^[34]研究同样认为, 高氮肥条件下, 微生物大量消耗有机质的代谢活动会释放热量, 间接提升土壤的温度, 导致土壤表层水分蒸发加剧。

另外, 本研究结果已证实, 增氧灌溉配施氮肥对玉米生育中后期(V6~VT 时期)的土壤保水效果最显著, VT~R2 和 R2~R5 时期保水能力逐渐平衡。玉米 VE~V6 时期植株较小, 需水量和氮素需求均较低, 在此阶段, 氮肥虽然通过增氧灌溉提高了土壤中氮素的有效性, 但由于苗期玉米需水量低、根系发育不足、微生物活性较低, 增氧灌溉与施氮肥的协同效应尚未完全发挥, 但其改善土壤物理性状和促进氮素有效性的作用为后期生育阶段的显著保水效果奠定了基础。经过苗期到 V6~VT 时期的持续作用, 玉米生长进入快速积累阶段, 作物需水量快速增加, 增氧灌溉技术核心机制在于增强土壤氧气供给, 优化水分分布, 提高水分传输效率, 减少深层水分流失, 良好的土壤水气环境可以进一步促进根系向深层和更广

范围分布,使更多的土壤层参与水分的吸附与存储,提高了土壤的整体蓄水能力。此外,更高的孔隙度意味着土壤中能够容纳更多的水分,进一步增强了土壤的保水效果。与 CK 相比,虽然增氧灌溉能够改善土壤氧气供给和通气性,但在缺乏氮肥的情况下,根系和微生物活动受到土壤中有限氮素的限制,无法充分发挥作用,导致根系的呼吸代谢、土壤改良效果有限。

3.2 增氧灌溉配施氮肥对土壤化学性质的影响

在增氧灌溉条件下施用氮肥,不仅可以改善土壤的通气环境,还能够促进氮素在土壤中的有效转化与循环,有助于提升有机碳的积累。适量的氮肥供应能够缓解红壤中常见的养分失衡问题,使土壤养分结构趋于合理。同时,增氧条件下的氮素输入改变了土壤碳氮比例,使碳氮比维持在适宜范围内,更有利于微生物群落的活跃与稳定。土壤微生物在充足氧气和氮素供应的双重作用下,其分解有机质的速率明显加快,进而释放出氮、磷、钾等营养元素回补到土壤中。这种养分循环过程不仅增强了土壤肥力,还显著提高了有机碳和全氮的含量,从而实现土壤质量和养分供应能力的同步提升。朱瑾瑾等^[36]认为增氧灌溉通过优化土壤中的水气平衡,提高土壤中氧气的供应能力,促进微生物的代谢活性和有机质分解效率,从而提高土壤有机碳含量。此外,氮肥的施用为微生物活动提供了重要的氮源,加快了碳氮循环过程,进一步推动了土壤养分的积累和优化。郭茹等^[35]研究结果表明,合理配施氮肥能够有效降低土壤碳氮比,避免因碳氮比例失衡导致的微生物代谢效率下降。在本研究中,增氧灌溉配施氮肥能够提高耕层土壤有机碳、全氮含量,表明增氧灌溉技术与氮肥的协同作用能够在改善土壤通气性的同时,促进氮素在土壤中的有效积累,并减少氮素的挥发和流失,其中以中量氮肥(N2)和高量氮肥(N3)表现最佳。究其原因,一方面是由于增氧灌溉条件下好氧微生物在充足的氧气条件下能够更高效地分解有机质,释放出大量的碳和氮等营养元素,这一过程不仅可以提升土壤有机碳的积累,还显著增加了全氮含量。另一方面氮肥的施用为微生物活动提供了充足的氮源,促进了土壤微生物的繁殖和活性,同时加速了碳氮循环的平衡过程。

此外,土壤化学性质的改变与微生物活性的相互作用密不可分。在增氧灌溉条件下施氮肥不

仅显著优化了土壤的养分结构,也通过调节土壤微生物的生长环境进一步推动了土壤有机质的分解与养分的有效积累。本研究结果表明,试验初始阶段(2021年),虽然增氧灌溉改善了土壤通气性,促进了需氧微生物的活性,但氮素是微生物合成蛋白质和核酸的核心元素,养分不足限制了细菌的繁殖速度,因此CK的细菌生物量最低,仅为 2.41×10^9 个/g。而高量施氮(N3)因提供了更充足的氮素养分,其细菌生物量最高,较CK显著增加60.99%。2023年,增氧灌溉配施氮肥的作用效果趋于平稳,细菌生物量整体有增长,但高量氮肥(N3)略有下降,N3处理细菌生物量较2022年减少,但仍高于其他处理组,可能是由于持续高氮施用可能打破土壤有机碳与氮的平衡,因为相关研究表明,长期高氮促进代谢活跃,消耗有机质,破坏团粒结构,反而削弱部分微生物生境^[26]。

同样,在增氧灌溉条件下施氮肥可以有效增加土壤速效养分含量,以中量氮肥(N2)对提升土壤速效养分效果最佳,分析其原因主要包括以下两点:一方面由于增氧灌溉技术直接或者间接地刺激了微生物的活动,土壤细菌生物量增加,加速有机质分解为土壤有效养分。另一方面,土壤碳氮比偏高或偏低均会抑制土壤微生物繁殖及土壤酶活性,本研究中 300 kg/hm^2 氮肥施用量处理下土壤碳氮比较其他处理最接近土壤微生物活动的最适宜碳氮比(25:1),从而释放出更多的速效养分供作物吸收利用。

3.3 增氧灌溉配施氮肥对玉米产量及氮肥利用效率的影响

前期大量研究均表明,与传统灌溉方式相比,增氧灌溉技术能够增强土壤微生物活性,促进氮素的有效矿化和转化,同时提升根系吸收养分的效率,为作物生长提供更加均衡和稳定的氮素供应^[1-2]。因此,增氧灌溉配施氮肥技术通过优化土壤氧气供给、改善土壤的水气平衡,进一步形成稳定的团粒结构,提升了土壤的养分供应效率,从而实现玉米产量增加。本研究结果表明,增氧灌溉施肥条件下,中量施氮条件下(N2)对提高玉米产量效果最佳,但高量施氮条件下(N3)对提高玉米产量效果较差,一方面是过量氮肥会刺激玉米群体生长过于旺盛,植株高度和叶面积快速扩展,导致个体间争夺光照、水分和养分的竞争加剧。结果是营养生长过度消耗了能量和养分,

不利于生殖生长,造成穗位结实率下降、穗粒数减少和粒质量降低,最终削弱了籽粒产量。另一方面是由于高氮水平可能引发生理上的“氮胁迫”。当土壤中氮素过剩时,植株的碳氮代谢平衡被打破,表现为贪青晚熟、籽粒灌浆不充分,导致有效穗数下降和籽粒充实度不足。这种现象不仅影响了当季的收获量,还可能削弱后期植株抗倒伏和抗病虫的能力。此外,在增氧灌溉条件下,中量施氮(N_2)的配合更能体现该技术的优势,增氧环境改善了土壤通气性和微生物活性,加速了氮素转化与吸收,使得氮肥利用率达到最优。而过量施氮则超出了作物的需求阈值,即便在增氧灌溉条件下,也无法完全吸收利用多余的氮素,反而增加了氮素淋失风险,加剧温室气体排放,对环境造成不利影响。

前人研究指出,施氮量和作物籽粒产量呈二次曲线关系,在一定阈值范围内,施氮能增加产量;当施氮量超过临界值时,产量会有所下降。本团队前期经过长期田间定位试验可知,长期增氧灌溉为土壤微生物群落提供了良好的生存条件,累积效应在应用初期逐渐显现,但到后期因微生物种群逐步适应了水气优化的环境,形成一种稳定且高效的微生态系统,表现为增产效果趋于饱和^[26]。本研究同样表明,在增氧灌溉的基础上配施氮肥对玉米籽粒产量的影响呈二次函数,随着施氮量的增加,玉米籽粒产量呈先增加后降低的趋势,这与前人研究结论一致。在本研究中,2021 年和 2022 年的最高施氮量较高,分别为 355.29、414.69 kg/hm²,与之相比,2023 年的最高施氮量显著下降,仅为 253.54 kg/hm²,但产量却达到 17 016.85 kg/hm²,显著高于 2021 年和 2022 年。主要是由于随着增氧灌溉技术的长期应用,土壤的理化性质和微生物环境得到了进一步优化,中等施氮量(N_2)即可满足作物对养分的需求,从而实现较高产量,这与前 2 a 施氮量需求较高的情况形成鲜明对比,进一步证明增氧灌溉技术的累积效应对提升氮肥利用效率和促进作物增产的重要作用。大量研究同样证实,氮素过量会引发高氮胁迫、群体过大、土壤盐分累积和氮素流失,当施氮量超过玉米的吸收能力时,作物玉米贪青晚熟,氮素利用效率显著下降,表现为边际效益递减,故施氮量达到一定水平后,玉米籽粒产量会表现为下降。

3.4 局限性分析与后续研究

虽然施用氮肥能够有效提高作物产量,但在增氧灌溉条件下也可能加剧氮素损失。改善的土壤通气性会加快硝化和反硝化过程,会增加 N_2O 排放和 NO_3 淋失的风险。尽管本研究系统地评估了增氧灌溉结合不同施氮水平对土壤理化性质以及玉米氮素利用效率的影响,但若仅从产量和资源利用效率的角度来评价氮肥利用,可能无法全面反映其环境与生态后果,在未来的研究中,会定量评估在不同施氮处理下 N_2O 排放强度和硝态氮损失,持续通过田间定位试验系统掌握氮肥投入-转化-输出的全过程,为建立绿色高效的施肥体系提供科学依据。

4 结论

(1) 在广东红壤区的增氧灌溉条件下,施氮量为 300 kg/hm²和 450 kg/hm²的处理显著降低了 0~40 cm 耕作层的土壤容重并提高了土壤孔隙度。其中,300 kg/hm²处理在 4 a 间表现出更稳定和持续的土壤物理性状改善效果,表明该施氮水平在土壤结构优化与资源投入效率之间实现了更好的平衡。

(2) 施氮量为 450 kg/hm²的处理显著增加了土壤有机碳和全氮含量,反映出更强的土壤养分累积效应。然而,300 kg/hm²处理更有利于提高速效养分(如碱解氮和速效钾)含量,并增强土壤细菌生物量,说明在增氧灌溉条件下,中等施氮水平更有助于促进养分循环和微生物活性。

(3) 氮肥施用显著提高了玉米产量,其中 300 kg/hm²处理在各季节中均表现出更高的产量水平。产量拟合分析表明,玉米的最佳施氮量约为 285.2 kg/hm²。氮肥农学效率随氮肥施用量增加呈先升后降的趋势,而氮素利用效率则随氮肥施用量的增加而下降,表明过量施氮会出现边际效益递减,并伴随潜在的氮素损失风险,未来应结合氮素淋溶监测与模拟评估,进一步优化增氧灌溉与施氮模式,以降低氮素流失风险并保障水环境安全,实现绿色高效的可持续农业生产。

参考文献

- [1] DU Y D, CUI B J, ZHANG Q, WANG Z, SUN J, NIU W Q. Effects of manure fertilizer on crop yield and soil properties in China: a meta-analysis[J]. *Catena*, 2020, 193: 104617.
- [2] 李丹丹, 申卫收. 农田土壤氮氧化物排放特征和关键驱动因素研究进展综述[J/OL]. *农业环境科学学报*, 1-20. (2025-06-26)[2025-08-02].

- <https://link.cnki.net/urlid/12.1347.S.20250626.1441.003>.
LI D D, SHEN W S. Research advances on the emission characteristics and key driving factors of agricultural nitrogen oxides[J/OL]. Journal of Agro-Environment Science, 1-20. (2025-06-26)[2025-08-02]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1347.S.20250626.1441.003>. (in Chinese)
- [3] 孙亚楠, 段琳博, 钟华昱, 蔡焕杰, 王晓云, 赵政鑫. 温室气体排放与番茄产量对水肥气耦合的响应机制研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 312-322.
SUN Y N, DUAN L B, ZHONG H Y, CAI H J, WANG X Y, ZHAO Z X. Response mechanism of soil greenhouse gas emission and yield of greenhouse tomato to water fertilizer coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 312-322. (in Chinese)
- [4] 赵婧, 曹琰梅, 柯浩楠, 何昊, 刘森, 吴荣军, 李琪, 胡正华. 大气 CO₂ 浓度和温度升高对不同施氮量粳稻叶绿素荧光特性的影响[J/OL]. 农业环境科学学报, 1-19. (2025-06-17)[2025-08-02]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1347.s.2025-0616.1628.004>.
ZHAO J, CAO Y M, KE H N, HE H, LIU M, WU R J, LI Q, HU Z H. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature on chlorophyll fluorescence characteristics of japonica rice with different nitrogen applications[J/OL]. Journal of Agro-environment Science, 1-19. (2025-06-17)[2025-08-02]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1347.s.20250616.1628.004>. (in Chinese)
- [5] LIU H Q, LI Y, WANG Y L, WANG P F, SHANG Y P, YANG X H, WANG F, YU A Z. Drive soil nitrogen transformation and improve crop nitrogen absorption and utilization-a review of green manure applications[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 14: 1305600.
- [6] 于珍珍, 汪春, 王宏轩, 李海亮, 孙海天, 张秀梅. 增氧灌溉技术应用现状与展望[J]. 农机化研究, 2025, 47(8): 292-300.
YU Z Z, WANG C, WANG H X, LI H L, SUN H T, ZHANG X M. Oxygenated irrigation technology application status and prospect[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(8): 292-300. (in Chinese)
- [7] BHATTARAI S P, MIDMORE D J, PENDERGAST L. Aerated subsurface irrigation water gives growth and yield benefits to lettuce, zucchini, broccoli and cotton in heavy clay soils[J]. Annals of Applied Biology, 2004, 144(3): 285-298.
- [8] YU Z Z, WANG C, ZOU H F, WANG H X, LI H L, SUN H T, YU D S. The effects of aerated irrigation on soil respiration and the yield of the maize root zone[J]. Sustainability, 2022, 14(8): 4378.
- [9] 于珍珍, 邹华芬, 于德水, 汪春, 李海亮, 孙海天. 加气灌溉下土壤呼吸与环境因子相关性研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 390-401, 410.
YU Z Z, ZOU H F, YU D S, WANG C, LI H L, SUN H T. Correlation of soil respiration and environmental factors under aerated irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 390-401, 410. (in Chinese)
- [10] YU Z Z, WANG H X, YU D S, YIN N X, ZHANG J. The effect of aeration and irrigation on the improvement of soil environment and yield in dryland maize[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1464624.
- [11] 张倩, 曾健, 张振华, 雷宏军, 张鹏, 柳栋. 循环曝气地下滴灌下温室番茄生长特性与产量研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 365-377.
ZHANG Q, ZENG J, ZHANG Z H, LEI H J, ZHANG P, LIU D. Impacts of cycle aerated subsurface drip irrigation on growth characteristics and yield of greenhouse tomato[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 365-377. (in Chinese)
- [12] LEI H J, YU J, ZANG M, PAN H W, LIU X, ZHANG Z H, DU J. Effects of water-fertilizer-air-coupling drip irrigation on soil health status: soil aeration, enzyme activities and microbial biomass[J]. Agronomy, 2022, 12(11): 2674.
- [13] 于珍珍, 王宏轩, 邹华芬, 孙海天, 汪汇源, 汪春, 李海亮. 加气灌溉下红壤土呼吸速率变化及其与土壤水氧的关系[J]. 热带作物学报, 2022, 43(1): 110-118.
YU Z Z, WANG H X, ZOU H F, SUN H T, WANG H Y, WANG C, LI H L. Changes of red soil respiration rate under aerated irrigation and its relationship with soil water and oxygen[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022, 43(1): 110-118. (in Chinese)
- [14] 于珍珍. 玉米加气渗灌增产机理与控制系统研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2023.
YU Z Z. Study on the mechanism and control system of maize aerated percolation irrigation to increase yield[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [15] ZHANG L Q, FENG Y D, ZHAO Z H, CUI Z G, BAOYIN B T, WANG H Y. Maize/soybean intercropping with nitrogen supply levels increases maize yield and nitrogen uptake by influencing the rhizosphere bacterial diversity of soil[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1437631.
- [16] 陈慧, 侯会静, 蔡焕杰, 朱艳. 加气灌溉温室番茄地土壤 N₂O 排放特征[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 111-117.
CHEN H, HOU H J, CAI H J, ZHU Y. Soil N₂O emission characteristics of greenhouse tomato fields under aerated irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(3): 111-117. (in Chinese)

- [17] BHATTARAI S P, BALSYS R J, EICHLER P. Dynamic changes in bubble profile due to surfactant and tape orientation of emitters in drip tape during aerated water irrigation[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2015, 100(75): 137-143.
- [18] ABUARAB M, MOSTAFA E, IBRAHIM M. Effect of air injection under subsurface drip irrigation on yield and water use efficiency of corn in a sandy clay loam soil[J]. *Journal of Advanced Research*, 2013, 4: 493-499.
- [19] ZHANG Z, YANG R Y, ZHANG Z H, GENG Y J, ZHU J J, SUN J N. Effects of oxygenated irrigation on root morphology, fruit yield, and water-nitrogen use efficiency of tomato (*Solanum lycopersicum* L.)[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2023, 23(4): 5582-5593.
- [20] LEI H J, FAN Y M, XIAO Z Y, JIN C C, CHEN Y Y, PAN H W. Comprehensive evaluation of tomato growth status under aerated drip irrigation based on critical nitrogen concentration and nitrogen nutrient diagnosis[J]. *Plants*, 2024, 13(2): 270.
- [21] 罗统成, 唐怿舟, 张文萍, 彭飞宇, 胡德勇, 蒋正义, 彭博. 增氧-控水灌溉对水稻生理生长特性及产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2024, 43(12): 39-46.
- LUO T C, TANG Y Z, ZHANG W P, PENG F Y, HU D Y, JIANG Z Y, PENG B. Effects of regulated aerated irrigation on growth and yield of rice[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2024, 43(12): 39-46. (in Chinese)
- [22] XIAO R, LEI H J, ZHANG Y L, XIAO Z Y, YANG G, PAN H W. The influence of aerated irrigation on the evolution of dissolved organic matter based on three-dimensional fluorescence spectrum[J]. *Agronomy*, 2023, 13(4): 980.
- [23] NYAMWANGE M M E, NJERU E M, MUCHERU MUNA M. Tillage, mulching and nitrogen fertilization differentially affects soil microbial biomass, microbial populations and bacterial diversity in a maize cropping system[J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2021, 5: 614527.
- [24] ZHANG X L, HU B, WANG S W, DONG W Y, GOPALAKRISHNAN S, JIN T, LIU E K. Response of the fate of in-season fertilizer nitrogen to plastic mulching in rainfed maize croplands of the loess plateau[J]. *Plants*, 2022, 11(18): 2343.
- [25] 于珍珍. 水肥气耦合调控土壤环境对玉米生长影响的研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2020.
- YU Z Z. Research on the influence of soil environment on corn growth regulated by water-fertilizer-gas coupling[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [26] JIANG X M, YAN X, LIU S Y, FU L L, GAO X M, HUANG D Y. Nitrogen addition decreased respiration and heterotrophic respiration but increased autotrophic respiration in a cabbage (*Brassica pekinensis* Rupr) experiment in the Northeast Plains[J]. *Agriculture*, 2024, 14(4): 596.
- [27] LIU F, ZHOU F, WANG X L, ZHAN X X, GUO Z X, LIU Q L. Optimizing nitrogen management enhances stalk lodging resistance and grain yield in dense planting maize by improving canopy light distribution[J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 148: 126871.
- [28] 于珍珍, 尹凝霞, 王宏轩, 李承罡, 康智炜, 于德水. 长期加气渗灌提升土壤环境与玉米增产机理研究[J]. *农业机械学报*, 2025, 56(8): 589-601.
- YU Z Z, YIN N X, WANG H X, LI C G, KANG Z W, YU D S. Mechanism of long-term aerated infiltration irrigation to enhance soil environment and increase corn yield[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025, 56(8): 589-601. (in Chinese)
- [29] 赵耀东, 潘一展. 连续多年减氮配施生物炭对土壤酶活性、微生物群落及花生产量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(17): 260-267.
- ZHAO Y D, PAN Y Z. Impacts of reduced nitrogen combined with biochar application for many consecutive years on soil enzyme activity, microbial community and peanut yield[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(17): 260-267. (in Chinese)
- [30] 易树生. 长期有机无机肥配施对西北旱地麦田土壤物理性质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
- YI S S. Effects of long-term combined application of organic and inorganic fertilizers on soil physics in dry wheat fields in Northwest China[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024. (in Chinese)
- [31] 杨永霞, 董志多, 赵玉鹏, 冯耀祖, 扁青永, 付彦博, 李鑫月. 增氧灌溉对土壤环境和棉花苗期耐盐性的影响[J/OL]. *农业环境科学学报*, 1-16. (2025-03-10)[2025-07-31]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1347.s.20250307.1426.002>.
- YANG Y X, DONG Z D, ZHAO Y P, FENG Y Z, BIAN Q Y, FU Y B, LI X Y. Effects of aerated irrigation on soil environment and salt tolerance of cotton seedlings[J/OL]. *Journal of Agro-Environment Science*, 1-16. (2025-03-10)[2025-07-31]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1347.s.20250307.1426.002>. (in Chinese)
- [32] LIU M, KHAN S, ZWIAZEK J J. Overexpression of *Nicotiana tabacum* PIP1; 3 enhances root aeration and oxygen metabolism in canola (*Brassica napus*) plants exposed to root hypoxia[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2024, 216: 109122.
- [33] WANG X J, TIAN L, WANG T L, ZHANG E H. Replacing nitrogen in mineral fertilizers with nitrogen in maize straw increases soil water-holding capacity[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 9337.

- [34] AZEEM K, NAZ F, NADEEM F, JHANZAB H M, SHER A, BIBI Y, QAYYUM A. Deciphering of Microbes×Nitrogen source fertilizers Interaction for improving nitrogen use efficiency in spring maize[J]. *Journal of King Saud University-Science*, 2023, 35(4): 102633.
- [35] 郭茹. 旱区农田秸秆碳和氮肥施用的固碳减排效应及水氮利用机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- GUO R. Effects of carbon sequestration and emission reduction and mechanism of water and nitrogen utilization by straw carbon and nitrogen fertilizer application in farmland in arid areas[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023. (in Chinese)
- [36] 朱瑾瑾. 加气滴灌调控土壤微生物提高番茄对水肥高效利用的机制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
- ZHU J J. Mechanisms of aerated drip irrigation for regulating soil microorganisms to enhance water and fertilizer utilization in tomato cultivation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024. (in Chinese)
- [37] WAN S, LIN Y X, HU H W, DENG M L, FAN J B, HE J Z. Excessive manure application stimulates nitrogen cycling but only weakly promotes crop yields in an acidic Ultisol: results from a 20-year field experiment[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2024, 23(7): 2434-2445.
- [38] HUANG Y, GAO F, KHAN R, ALI S, ZHOU X B. Synergistic effects of irrigation and nitrogen fertilisation on maize photosynthetic performance and yield of rainfed systems in drought-prone environments[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2024, 210(6): e12782.