

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.04.017

CSTR:32310.14.stbcbx.2026.04.017

李响,刘霞,屈忠义,等.水氮调控对盐渍化农田氮肥去向及气态损失的影响[J].水土保持学报,2026,40(4):115-127.

Li Xiang, Liu Xia, Qu Zhongyi, et al. Effects of water and nitrogen regulation on fate of nitrogen fertilizer and gaseous losses in saline-alkali farmland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(4):115-127.

水氮调控对盐渍化农田氮肥去向及气态损失的影响

李响¹, 刘霞¹, 屈忠义², 乔天¹, 于函弘¹, 赵靖怡¹

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;

2. 内蒙古科技大学能源与环境学院, 内蒙古 包头 014010)

摘要: [目的] 为探究水氮调控对盐渍化农田中 NH_3 和 N_2O 排放及氮肥利用率规律的影响。[方法] 以向日葵为研究对象, 设置 T1 轻度亏缺灌溉 (田持 65%~75%) 和 T2 充分灌溉 (田持 75%~80%) 2 个灌溉梯度, N1 (0 kg/hm²)、N2 (150 kg/hm²)、N3 (225 kg/hm²)、N4 (300 kg/hm²) 4 个施氮水平。通过分析不同灌溉梯度及施氮水平对 NH_3 和 N_2O 排放的影响, 明确盐碱地氮肥利用、残留、损失规律特征。[结果] 2 种灌溉条件下随着施氮量的增加, N_2O 排放通量和 NH_3 挥发速率均显著提高, N4 处理的排放峰值较 N3、N2 平均增加 4.4%~21.4%。在相同施氮水平下, T2 处理的累积 NH_3 挥发量与 N_2O 排放量分别高于 T1 处理 10.10%~20.41%、16.41%~39.77%, 且 T1 的氮肥气态损失率低于 T2 处理 7.05%~32.38%。¹⁵N 同位素示踪结果表明, 肥料氮素去向规律表现为氮肥损失率>氮肥残留率>氮肥利用率。残留肥料氮主要集中在 0~20 cm 土层, 占总残留量 46.13%~63.14%, 随着土层深度逐渐递减。T1 处理下向日葵的产量均优于 T2 处理, 提高 4.12%~12.38%, T1 处理的氮肥利用率较 T2 处理增加 8.46%~14.96%, 其中 T1N3 产量和氮肥利用率最高, 分别为 2 796.01 kg/hm² 和 26.10%。同时盐分对氮转化过程影响主要与盐分离子组成有关, $\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{HCO}_3^-$ 与气态氮排放速率呈正相关 ($r=0.57\sim0.86$)。[结论] 针对重度盐渍化农田, 在轻度亏缺灌溉条件下, 225 kg/hm² 施氮水平 (T1N3) 可在保障氮肥利用效率基础上, 有效降低氮肥残留与气态损失, 是减排增效的最优水氮管理模式。

关键词: 水氮调控; ¹⁵N 示踪技术; 氮肥气态排放; 氮肥利用率; 氮肥去向

中图分类号: X511; S145.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)04-0115-13

Effects of Water and Nitrogen Regulation on Fate of Nitrogen Fertilizer and Gaseous Losses in Saline-Alkali Farmland

Li Xiang¹, Liu Xia¹, Qu Zhongyi², Qiao Tian¹, Yu Hanhong¹, Zhao Jingyi¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2. School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the effects of water and nitrogen regulation on the emission patterns of NH_3 and N_2O and the nitrogen fertilizer utilization rate in saline-alkali farmland. [Methods] Sunflower was used as the research subject. Two irrigation gradients were set: T1, mild deficit irrigation (field capacity 65%-75%), and T2, full irrigation (field capacity 75%-80%). Four nitrogen application levels were established: N1 (0 kg/hm²), N2 (150 kg/hm²), N3 (225 kg/hm²), and N4 (300 kg/hm²). By analyzing the effects of different irrigation gradients and nitrogen application levels on NH_3 and N_2O emissions, the pattern characteristics of nitrogen fertilizer utilization, residue, and loss in saline-alkali land were clarified. [Results] Under the two irrigation conditions, with increasing nitrogen application rate, both the N_2O emission flux and NH_3 volatilization rate significantly increased. Peak emissions under the N4 treatment were 4.4%-21.4% higher than those under N3 and N2. Under the same nitrogen application level, the cumulative NH_3 volatilization and N_2O

收稿日期: 2025-12-26

修回日期: 2026-02-28

录用日期: 2026-03-24

网络首发日期 (www.cnki.net): 2026-04-01

资助项目: 内蒙古自然科学基金项目 (2023MS05024); 国家自然科学基金项目 (52369009)

第一作者: 李响 (2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事盐渍化农田水氮高效利用研究。E-mail: 1714908910@qq.com

通信作者: 刘霞 (1971—), 女, 博士, 教授, 主要从事农业水土资源利用与水土环境调控研究。E-mail: liukasumi@126.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

emissions under the T2 treatment were 10.10%–20.41% and 16.41%–39.77% higher than those under the T1 treatment, respectively. The gaseous nitrogen fertilizer loss rate under the T1 treatment was 7.05%–32.38% lower than that under the T2 treatment. The ^{15}N isotope tracing results showed that the fate of fertilizer nitrogen followed the pattern: nitrogen fertilizer loss rate > nitrogen fertilizer residual rate > nitrogen fertilizer utilization rate. The residual fertilizer nitrogen was mainly concentrated in the 0–20 cm soil layer, accounting for 46.13%–63.14% of the total residual amount, and gradually decreased with increasing soil layer depth. Under the T1 treatment, the sunflower yield was higher than that under the T2 treatment by 4.12%–12.38%. The nitrogen fertilizer utilization rate under the T1 treatment was 8.46%–14.96% higher than that under the T2 treatment. Among them, the T1–N3 treatment achieved the highest yield and nitrogen fertilizer utilization rate, reaching 2 796.01 kg/hm² and 26.10%, respectively. Additionally, the effects of salinity on the nitrogen transformation process were mainly related to the composition of salt ions, and $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ and HCO_3^- were positively correlated with the gaseous nitrogen emission rate ($r = 0.57\text{--}0.86$). [Conclusion] For severely saline-alkali farmland, under mild deficit irrigation conditions, a nitrogen application level of 225 kg/hm² (T1N3) can effectively reduce nitrogen fertilizer residue and gaseous losses while ensuring nitrogen fertilizer utilization efficiency, representing the optimal water and nitrogen management mode for emission reduction and efficiency improvement.

Keywords: water and nitrogen regulation; ^{15}N tracer technique; gaseous nitrogen fertilizer emission; nitrogen fertilizer utilization rate; fate of nitrogen fertilizer

Received: 2025-12-26

Revised: 2026-02-28

Accepted: 2026-03-24

Online(www.cnki.net): 2026-04-01

氮是生命必需元素,在植物生长和代谢过程中起着至关重要的作用^[1]。氮肥被广泛用于农业生产,为作物提供氮素营养,有效提高作物的产量和品质^[2]。然而,过量施加氮肥并不能显著提高产量,反而降低经济效益^[3],加剧土壤盐渍化程度,并造成大量氮素以气态形式排放到大气中,主要包括 N_2O 排放和 NH_3 挥发 2 种氮肥气态损失,对农田生态环境造成严重污染^[4]。 N_2O 是重要的温室气体,其增温趋势是二氧化碳的 298 倍,在大气中具有较长寿命,长期持续影响气候并破坏臭氧层。

推动氮肥科学施用,提高利用效率是我国农业绿色发展的关键方向。因此,深入探索氮素空间分布及去向,明确氮肥的利用与损失机制,对优化农田管理、提升氮肥利用率具有重要意义。近年来,我国在科学施用氮肥方面取得一定进展,相关研究^[5]表明,氮肥施用显著增加棉田土壤 N_2O 排放,同时配施硝化抑制剂则有助于减少排放,提高棉花产量和氮肥利用率。土壤盐度对 N_2O 排放具有显著影响,较高的土壤盐度抑制硝化作用的 2 个步骤,但其对亚硝酸盐氧化的抑制作用强于对氨氧化的抑制作用,导致在特定盐度范围内的土壤中 NO_2^- -N 积累增加,并增强 N_2O 排放^[6]。中盐土壤的氨挥发率显著高于非盐性土壤,且随着土壤盐度的增加,挥发速率提升^[7-8]。已有研究^[9]表明,土壤盐分显著促进氮转化过程,尤其是硝化作用,导致盐碱土壤中 N_2O 和 NH_3

排放同步增加。后续研究^[10]表明,中度盐碱土壤的氨挥发量显著高于轻度盐碱土,且氨挥发量与施氮量呈正相关;在管理调控方面,陈思静等^[11]研究发现,通过优化滴灌水量与追氮比例可有效降低 N_2O 排放,类似研究^[12]中适量减少灌水量和施氮量也显著降低氨挥发与 N_2O 累积排放量。灌水量和施氮量共同影响土壤中的氮素分布与转化,现有研究^[13]多聚焦于单一气态氮(如 N_2O 或 NH_3)的排放特征,或仅关注水盐氮单因素的作用,综合考虑水氮互作对盐渍化农田氮素多途径损失与利用效率的系统研究仍显缺乏。本研究通过测定向日葵盐碱地的 N_2O 排放通量和 NH_3 挥发速率,结合 ^{15}N 同位素示踪技术,系统分析盐渍化农田在水氮调控下,作物生育期内土壤氮素分布与去向,明确不同灌水量和施氮量对土壤氮肥损失与利用率的影响。研究结果为盐碱地优化氮肥施用、提高氮肥利用效率、减少氮素损失、降低环境风险提供合理方案,从而使现代农业可持续发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2024 年、2025 年 5—9 月,在内蒙古自治区鄂尔多斯市达拉特旗东海新村(40°29′28″N,109°52′07″E)试验基地进行。达拉特旗属于典型温带大陆性气候,试验期内,年平均气温 8.63℃,年平均降水量 440.97 mm,年平均累计日照时间 3 424 h,年平

均水面蒸发量 2 161~2 600 mm,降水年内分配不均,主要集中在 7—9 月,2024 年、2025 年降雨量及其他气象数据见图 1。试验区土壤质地为粉壤土,土壤体积质量 1.48 g/cm³,田间持水率 0.36 cm/cm³。试验

初期 0~20 cm 土层土壤 pH 为 8.50,盐分质量分数为 10.35 g/kg,属于重度盐渍化土壤。全氮、有机质质量分数分别为 0.69、11.67 g/kg,速效磷、速效钾、水解氮质量分数分别为 9.80、362.50、138.34 mg/kg。

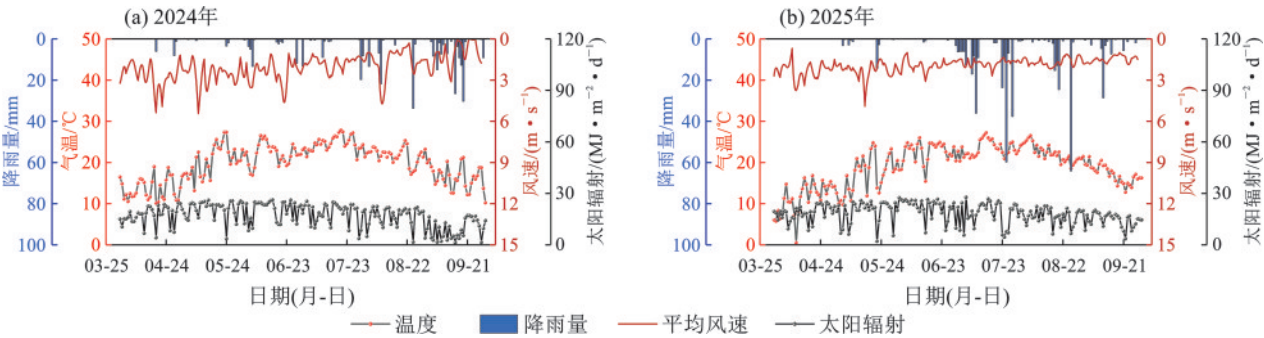


图 1 2024—2025 年试验区气象数据
Fig.1 Meteorological data of study area (2024—2025)

1.2 研究方法

试验设置 T1 轻度亏缺(田间持水量 65%~75%),T2 充分灌溉(田间持水量 75%~80%)2 个灌溉梯度(下限值-上限值);N1(0 kg/hm²)、N2(150 kg/hm²)、N3(225 kg/hm²)、N4(300 kg/hm²)4 个施氮水平,共 8 个处理,其中 T1N1 与 T2N1 作为对照处理。每个处理重复 3 次,共 24 个试验小区,

各小区面积为 25 m²(5 m×5 m),小区之间设置 1 m 隔离保护带。于各小区内设置 ¹⁵N 试验微区(2 m×2 m),微区四周挖沟用塑料膜围封,地下部分埋深 100 cm,地上部分用 10 cm 聚乙烯挡板将四周围成区域,防止 ¹⁵N 标记尿素的横向流失及相邻区域污染。8 种处理的田间小区及微区试验布置见图 2。

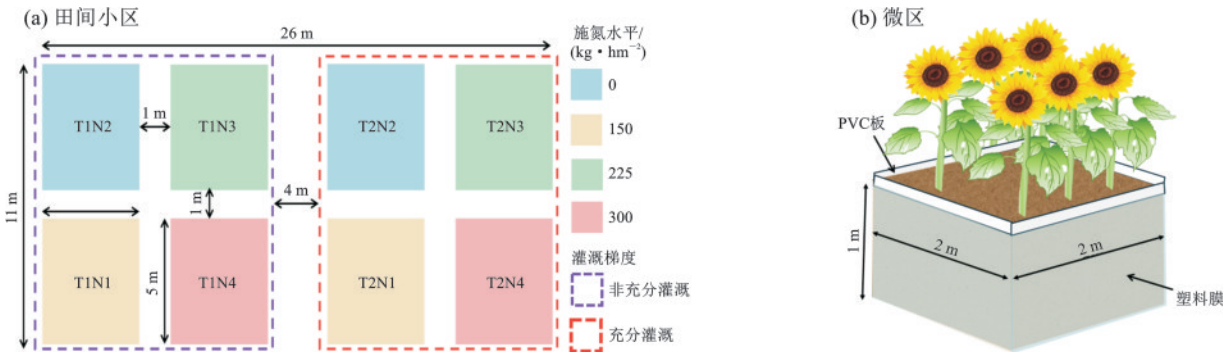


图 2 田间小区及微区试验布置示意
Fig.2 Schematic diagram of layout of field-plot and micro-plot experiments

供试作物向日葵,品种为“三瑞 10 号”食葵,具有耐盐碱及抗病等特点,每年 6 月 7 日播种,9 月 25 日收获,生育期约为 110 d。播种参考当地向日葵种植方式,采用行距 60 cm,株距 50 cm。播种前仅以磷肥(P₂O₅)与钾肥(K₂O)作为底肥统一施入施用量分别为 108.4、86.8 kg/hm²,于向日葵现蕾期进行追肥,微区施肥方式为穴施,于根区土壤随水追施 ¹⁵N 标记尿素(由上海化工研究院生产),丰度为 10.18%(含氮 46.0%)小区采用膜下滴灌水肥一体化追施未标记尿素(含氮 46.0%),每个小区配置独立直通阀和水表,以控制不同的施氮量及灌水量。播种后各处理统一灌水 150 m³/hm²,从苗期开始按照计划湿润层深度(取 40 cm)及土壤含水率确定灌水量,当含水量低于

或者接近设计下限值时,根据设计上限值确定的灌水量进行灌溉,全生育期共灌水 6 次,每次灌水量为 150~200 m³/hm²,轻度亏缺梯度总灌溉定额为 900 m³/hm²,充分灌溉梯度为 1 100 m³/hm²,其他管理措施与当地农田相一致。

1.3 测定项目与方法

于各生育期取土样,土壤体积含水率采用烘干法测定,取土深度为 0~100 cm。土壤样品经自然风干后,混合碾压过 1 mm 网筛,按土水质量比 1:5 制成浸提液,测定土壤含盐量、Na⁺、K⁺、CO₃²⁻、HCO₃⁻、Cl⁻、Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻,其中 Na⁺、K⁺利用火焰光度法测定;CO₃²⁻、HCO₃⁻采用酸滴定法测定;Cl⁻采用硝酸银滴定法测定;Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻采用 EDTA 滴定法

测定。

N_2O 排放通过静态箱法收集,在取样前,将静态箱底座水平埋入土壤中,埋入高度为底座的 1/2,为减少非均匀施肥误差,取样点间隔 >5 m。取样时将静态箱体安置在底座上,使用 50 mL 气样袋分别采集 0、10、20、30 min 时间段 4 个气体样品,用于测定 N_2O 排放通量,其计算公式^[14]为:

$$F_{N_2O} = \rho h \frac{dc}{dt} \frac{273}{273 + t} \quad (1)$$

式中: ρ 为标准状态下 N_2O 密度, kg/m^3 ; h 为静态箱在土壤或地表水上方的有效高度, m; dc/dt 为室内 N_2O 气体浓度的增加速率, $mL/(m^3 \cdot h)$; t 为取样时静态箱内的平均空气温度, $^{\circ}C$ 。

NH_3 挥发通过准确度和精确度高的双层海绵通气法进行测定。与 N_2O 排放收集方法相似,取样前,收集装置土壤埋深 5 cm,取样点间隔 >5 m。取样时,将装置下部海绵取出并浸入 KCl 溶液,浸提液中的铵态氮采用靛酚蓝比色法测定。 NH_3 挥发速率计算公式^[15]为:

$$F_{NH_3} = \frac{0.01M}{AD} \quad (2)$$

式中: M 为通气法单个装置平均每次测得的氨含量, mg; A 为装置气室横截面积, m^2 ; D 为取样时装置实际累积吸收氨的时间, d 。

NH_3 累计总挥发量和 N_2O 累计总排放量计算公式为:

$$C_{N_2O} = \sum_i^n F_{N_2O_i} D_i \quad (3)$$

$$C_{NH_3} = \sum_i^n F_{NH_3_i} D_i \quad (4)$$

式中: $F_{N_2O_i}$ 为第 i 次和第 $i-1$ 次收集 N_2O 排放通量, $kg/(hm^2 \cdot d)$; $F_{NH_3_i}$ 为第 i 次和第 $i-1$ 次收集 NH_3 排放通量, $kg/(hm^2 \cdot d)$; D_i 为第 i 次和第 $i-1$ 次收集的时间间隔, d ; n 为采样次数。

氮肥气态损失率计算公式^[16]为:

$$G_{NLR} = \frac{G_N - G_{CK}}{F_N} \times 100\% \quad (5)$$

$$G_N = M_{N_2O-N} + M_{NH_3-N} \quad (6)$$

$$G_{CK} = M_{N_2O-CK} + M_{NH_3-CK} \quad (7)$$

式中: G_N 为施氮处理气态氮损失量, kg/hm^2 ; G_{CK} 为不施氮处理气态氮损失量, kg/hm^2 ; F_N 为施氮量, kg/hm^2 ; M_{N_2O-N} 为施氮处理下 N_2O 挥发氮损失量, kg/hm^2 ; M_{NH_3-N} 为施氮处理下 NH_3 挥发氮损失量, kg/hm^2 ; M_{N_2O-CK} 为不施氮处理下 N_2O 排放氮损失量, kg/hm^2 ; M_{NH_3-CK} 为不施氮处理下 NH_3 挥发氮损失

量, kg/hm^2 。

于向日葵成熟期,每个小区选取长势均匀的 10 株,测定百粒重和单株籽粒重量,并计算单位面积的产量。同时收取试验微区各处理 0~100 cm 土层土样及植株,将植株分解为根、茎、叶、盘、籽等部分,测定样品鲜重,并烘干后测得植株各部分干物质质量,样品过筛后使用稳定同位素质谱仪连接元素分析仪 (Vario Isotope Select) 测定植物各器官及土壤的全氮含量 (TN) 和稳定氮同位素值 ($\delta^{15}N$)。同位素相关指标计算公式^[17]为:

$$Ndff = \frac{a-c}{b-c} \times 100\% \quad (8)$$

$$Ndfs = \frac{d-c}{b-c} \times 100\% \quad (9)$$

式中: $Ndff$ 为植株氮素来源于肥料的比例, %; $Ndfs$ 为土壤氮素来源于肥料的比例, %; a 为植株样品中的 ^{15}N 丰度, %; b 为标记肥料中的 ^{15}N 丰度, %; c 为同位素自然丰度, 0.366 3%; d 为土壤样品中的 ^{15}N 丰度, %。

氮肥利用率 (NUE)、氮肥损失率 (NLR)、氮肥残留率 (NRF) 计算公式为:

$$N_p = M_p \times TN_p \quad (10)$$

$$N_f = N_p \times Ndff \quad (11)$$

$$N_s = N_p - N_f \quad (12)$$

$$NDR_F = \frac{N_f}{N_s} \times 100\% \quad (13)$$

$$NDR_S = \frac{N_s}{N_p} \times 100\% \quad (14)$$

式中: N_p 为各器官吸氮量, $g/plant$; M_p 为各器官干物质质量, g ; TN_p 为各器官全氮含量, g/kg ; N_f 为各器官对肥料氮的吸收量, $g/plant$; N_s 为各器官对土壤氮的吸收量, $g/plant$; NDR_F 为肥料氮贡献率, %; NDR_S 为土壤氮贡献率, %。

$$N_R = MS \times TN_s \times Ndfs \quad (15)$$

$$NUE = \frac{N_f}{TFN} \times 100\% \quad (16)$$

$$NRF = \frac{N_R}{TFN} \times 100\% \quad (17)$$

$$NLR = 1 - NUE - NRF \quad (18)$$

式中: N_R 为土壤中肥料氮残留量, g ; MS 为土壤干重, g ; TN_s 为土壤全氮量, g/kg ; TFN 为氮肥施用总量, g 。

1.4 数据处理

采用 Excel 2022 软件对试验数据进行整理,使用 SPSS 27 软件完成不同处理的显著性分析、多重比较 ($p \leq 0.05$), Furfer 23、Origin 2021 软件绘制相关图表。

2 结果与分析

2.1 灌水及施氮处理对农田水盐分布的影响

根据 2024 年、2025 年作物生育期内 0~100 cm 土层土壤水分分布(图 3)可知,各处理土壤含水率随土层深度增加呈递增趋势,0~40 cm 土层作为作物根系主要活动层,水分变化活跃,对作物吸水与降雨补给响应敏感,60~100 cm 土层土壤含水率较高且变化平缓。随生育期各处理土壤含水率呈先降低再升高趋势,说明作物旺盛生长阶段,蒸腾耗水量大,土壤

水持续消耗,在现蕾期达到最低值,随着作物逐渐成熟、生理需水减少,且生育后期降雨补给增加,土壤含水量增加。2024 年及 2025 年在相同灌溉梯度处理下,随施肥量增加,0~40 cm 土壤含水率分别下降 1.06%~4.53%、0.67%~1.89%;施肥量相同处理下,充分灌溉处理(T2)土壤含水率较轻度亏缺灌溉处理(T1)分别提高 7.06%~10.94%、1.97%~3.83%。2025 年降雨量较 2024 年提高 14.69%,各处理 0~100 cm 土层土壤含水率较 2024 年提高 3.98%~13.98%。

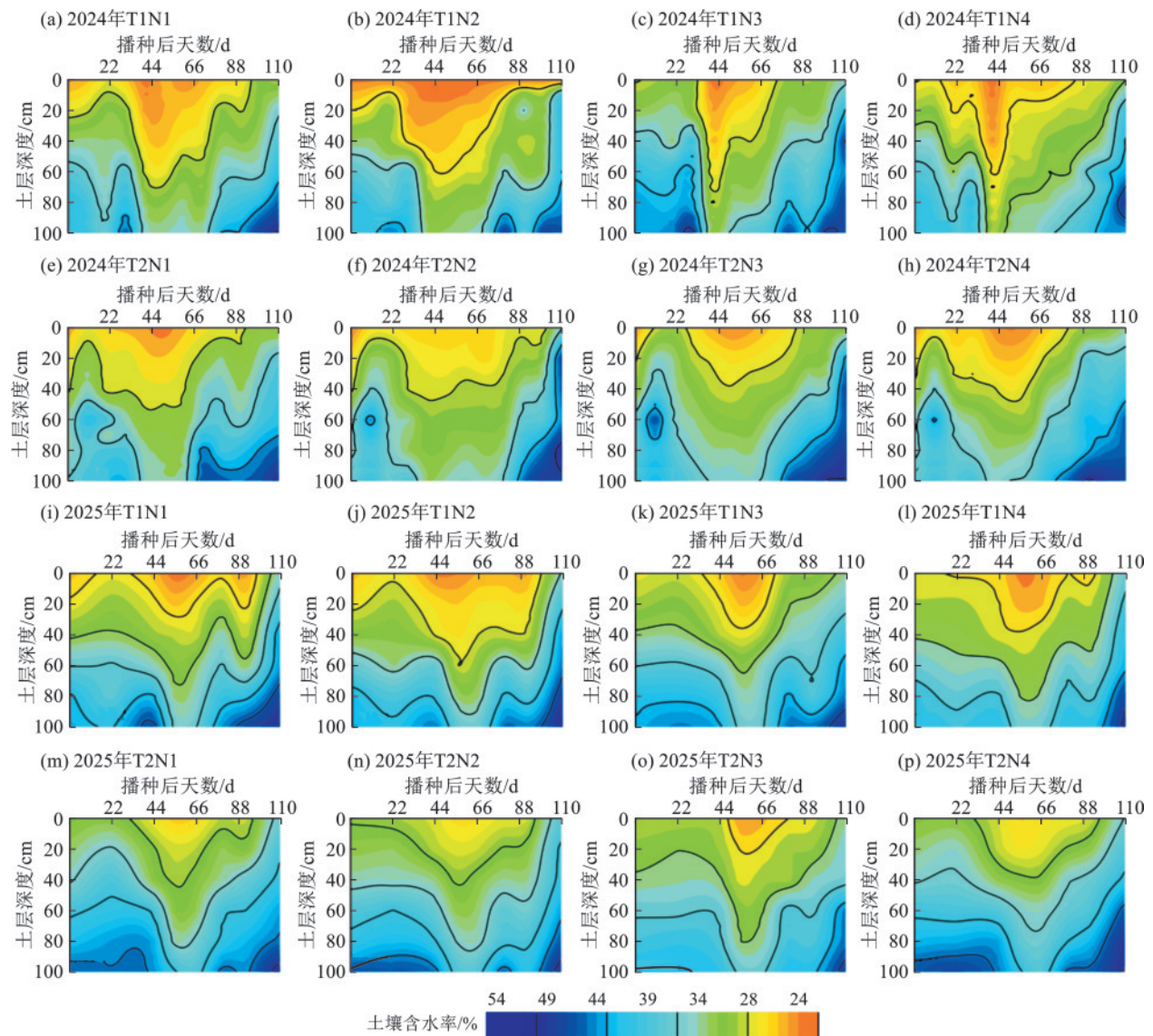


图 3 2024—2025 年生育期不同处理下土壤水分动态分布
Fig.3 Dynamic distribution of soil moisture under different treatments during growing seasons (2024—2025)

由图 4 可知,2024 年、2025 年作物生育期内 0~100 cm 土层土壤盐分动态分布,土壤含盐量随土层深度呈递减规律,且各处理 0~40 cm 土层盐分降低幅度显著大于 60~100 cm 土层。在生育期各处理土壤全盐量变化不显著,整体保持相对稳定。2024 年、2025 年在相同灌溉水量下,随着施肥量增加,

0~40 cm 土层全盐量增加 4.09%~5.71%、1.44%~3.44%,施肥量相同,充分灌溉(T2)较轻度亏缺灌溉(T1)分别降低 1.68%~13.02%、5.43%~13.84%。2025 年降雨量偏多,各处理 0~40 cm 土层全盐量较 2024 年降低 1.61~2.83 g/kg,表明降雨促进盐分向更深土层迁移。

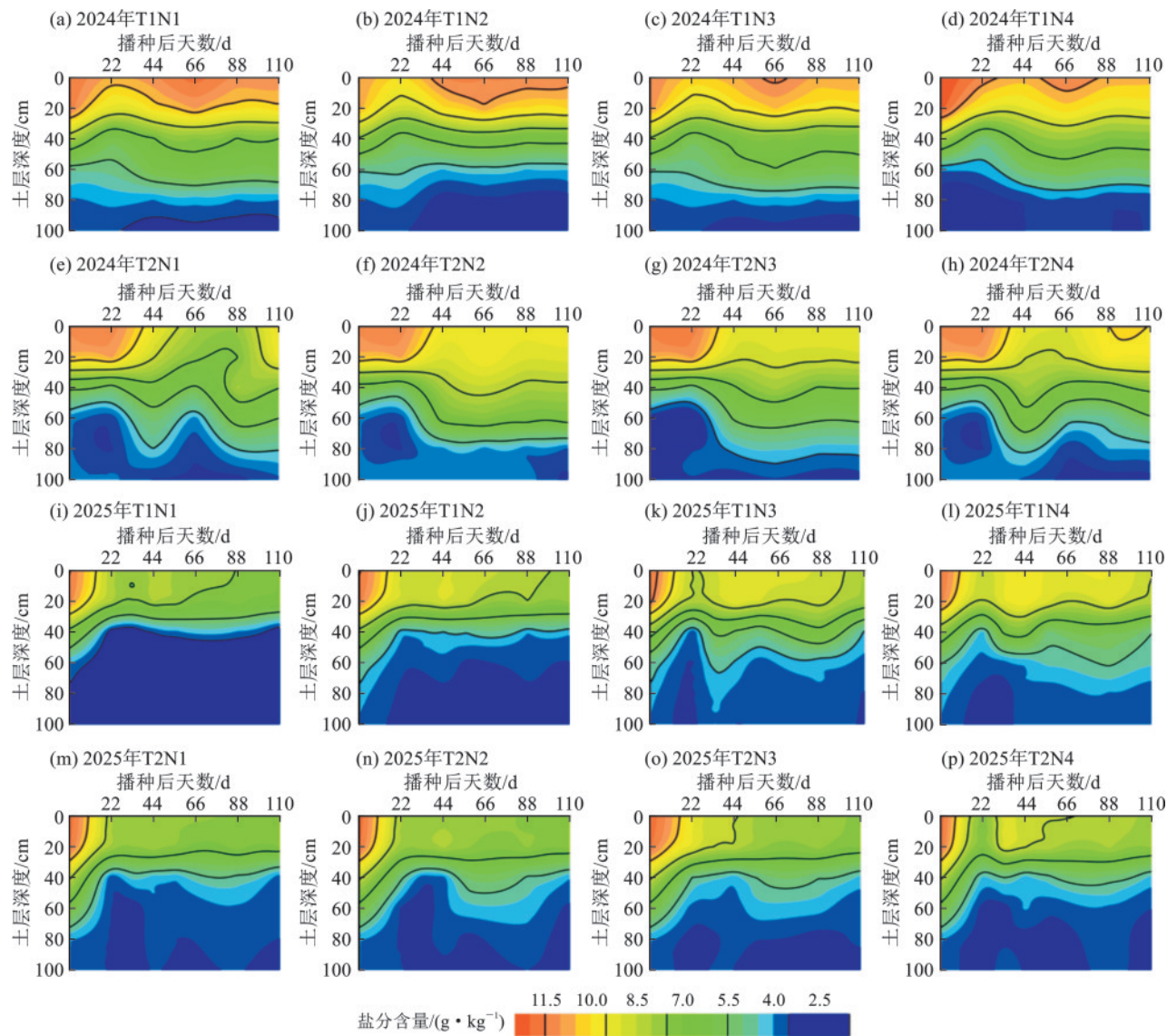


图 4 2024—2025 年生育期不同处理下土壤盐分动态分布

Fig.4 Dynamic distribution of soil salinity under different treatments during growing seasons (2024—2025)

2.2 灌水及施肥处理对盐碱地向日葵产量与氮肥去向的影响

2024—2025 年的盐碱地不同处理氮肥残留量见图 5a、图 5c。2 种灌溉梯度下, 0~20 cm 土层肥料氮残留量 T1N4 和 T2N4 显著高于其他处理, 其次为 T1N3 和 T2N3。2024 年 0~20 cm 土层残留量占 46.13%~60.33%, 20~40、40~60、60~100 cm 土层占比分别为 10.94%~19.16%、8.29%~15.01%、5.20%~22.06%; 2025 年各土层占比分布趋势相似, 对应土层比例分别为 46.89%~63.14%、17.63%~25.57%、6.34%~14.09%、4.88%~17.07%, 肥料氮残留量随土层深度而递减, 主要集中在 0~20 cm 土层。图 5b、图 5d 为 2 年不同处理肥料氮总残留量变化规律。肥料氮总残留量随施氮量增加显著上升(N4>N3>N2)。T1 处理下, N3 较 N2 残留量分别增加 61.89%、64.27%, N4 较 N3 分别增加

45.71%、38.49%; T2 处理下相对应分别增加 63.03%、63.01% 与 37.49%、37.38%。相同施氮水平, T2 各处理残留率较 T1 分别增加 4.80%~11.07%、2.95%~4.66%。

由图 6 可知, 2 a 试验中, 轻度亏缺灌溉梯度下向日葵的产量均优于充分灌溉($p<0.01$), 分别提高 4.12%~8.57%、5.24%~12.38%。2024 年 T1 处理下, N2、N3、N4 处理产量较 N1 分别提升 39.79%、77.87%、57.98%; T2 处理下, 各施氮水平分别提高 40.41%、85.47%、64.43%; 2025 年存在相似规律, T1 处理下, N2、N3、N4 处理产量较 N1 分别提升 32.45%、71.07%、51.54%; T2 处理下分别提升 38.45%、82.67%、59.73%。由表 1 可知, 2 种灌溉条件下, 向日葵植株对肥料氮利用率均表现为施氮水平 N3>N4>N2, N3 处理显著高于 N4、N2 处理($p<0.05$), 分别提高 13.05%~14.96%、9.60%~

10.62%。氮肥残留率随施肥量增加而呈增长态势,但其增长率随施肥量增加呈递减趋势,2024 年 T1 处理中 N3 的氮肥残留率较 N2 处理增加 7.93%,N4 处理较 N3 处理增加 6.36%,T2 处理中 N3 较 N2 处理增加 8.68%,N4 处理较 N3 处理增加

3.12%,次年增长趋势相同。不同处理下肥料氮素去向均以损失为主,表现为氮肥损失率>残留率>利用率。综合分析,T1N3 与 T2N3 处理能够在提高氮肥利用率的同时,减少土壤残留与损失,其中 T1N3 处理效果最佳。

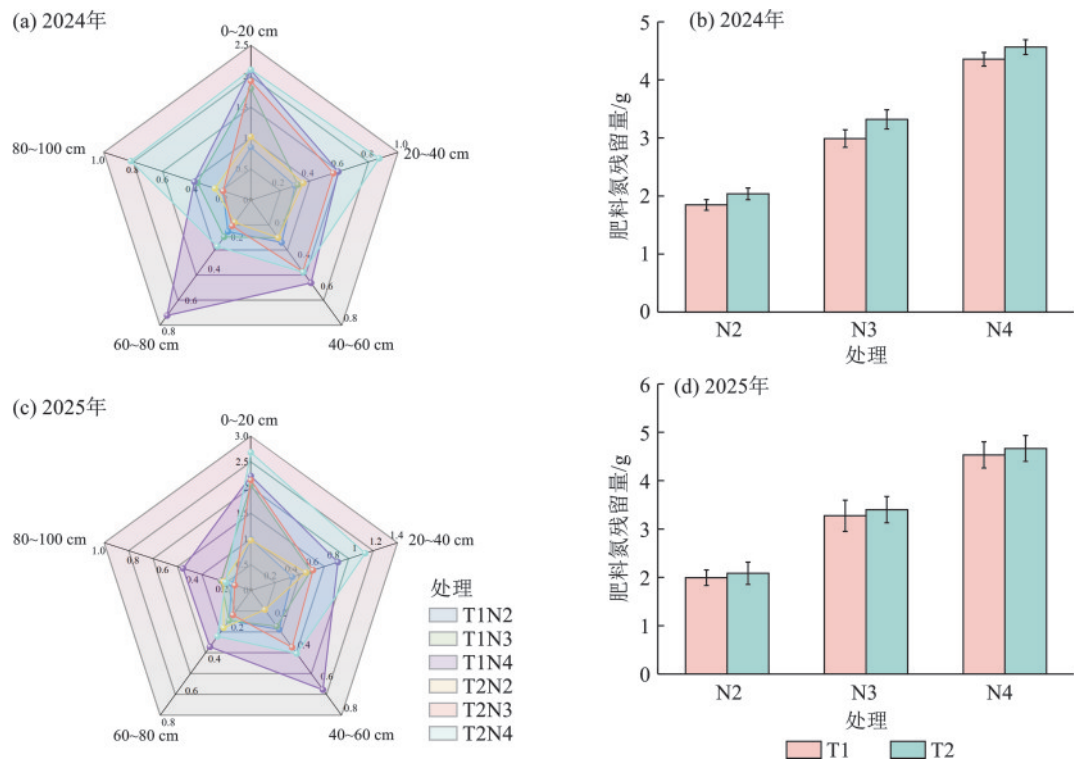
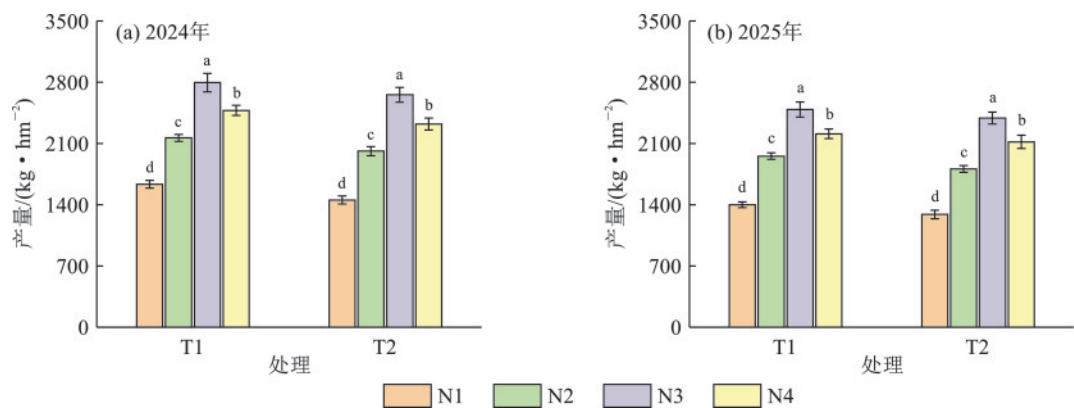


图 5 2024—2025 年不同土层肥料氮残留量及肥料氮总残留
Fig.5 Residual fertilizer nitrogen in different soil layers and total residual fertilizer nitrogen (2024—2025)



注:图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著, ($p<0.05$)。
图 6 2024—2025 年不同处理对向日葵产量的影响
Fig.6 Effects of different treatments on sunflower yield (2024—2025)

2.3 灌水及施氮处理对农田氨挥发的影响
由图 7a、图 7b 可知,不同灌溉梯度下各处理 NH_3 挥发速率在现蕾期追肥 2 d 内出现峰值,且随施氮量增加而升高,说明现蕾期追肥后氨挥发敏感,施氮量是影响氨挥发速率的直接因素。轻度亏缺灌溉(T1),2024 年 N4 处理 NH_3 挥发峰值较 N3、N2 分别增加 3.60%、11.76%,次年分别增加

14.29%、18.15%;充分灌溉(T2),2024 年 N4 处理较 N3、N2 分别增加 4.35%、12.37%,次年分别增加 7.69%、21.41%。施氮量相同,T2 处理 NH_3 挥发排放峰值均高于 T1,其中 T2N4 峰值最高达 $3.01 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$;相比于 T1、T2 处理的 NH_3 挥发排放峰值年均增加 6.46%~11.13%。2024 年、2025 年 NH_3 累计挥发量(表 2)。不同灌溉梯度下, NH_3 累积挥发

量 2 a 均随施氮量增加而升高,与 N3 和 N2 相比, T1 下的 N4 处理分别增加 4.93%~12.61% 和 15.70%~29.83%, T2 下则分别增加 5.87%~7.46% 与 15.97%~19.66%。施氮量相同时, T2 处理的 NH₃ 累计挥发量均高于 T1 处理。T2 处理的 NH₃ 挥发量较 T1 年平均增加 15.25%~19.78%。综合分析, T2N4 处理的 NH₃ 累计挥发量最显著,其次为 T2N3。

表 1 2024—2025 年不同处理下氮肥利用率、残留率及损失率的变化
Table 1 Changes in nitrogen fertilizer utilization rate, residual rate, and loss rate under different treatments (2024—2025)

处理	2024 年			2025 年		
	氮肥利用率/%	氮肥残留率/%	氮肥损失率/%	氮肥利用率/%	氮肥残留率/%	氮肥损失率/%
T1N2	21.59±0.62d	30.78±0.45e	47.63±0.27a	23.48±0.26c	33.20±0.40f	43.32±0.67b
T1N3	24.82±0.54a	33.21±0.54d	41.96±0.83b	26.10±0.36a	36.36±0.28d	37.54±0.47d
T1N4	22.42±0.27c	35.53±0.66c	42.06±0.72b	24.06±0.20e	37.77±0.42b	38.17±0.17d
T2N2	20.09±0.36e	33.94±0.56d	45.97±0.66a	21.13±0.35c	34.75±0.23e	44.12±0.43a
T2N3	23.28±0.29b	36.89±0.48b	39.83±0.76c	24.09±0.16b	37.76±0.55c	38.15±0.28d
T2N4	21.11±0.52cd	38.04±0.48a	40.85±0.96c	21.71±0.18d	38.88±0.33a	39.41±0.42c
施肥水平(A)	**	**	**	**	**	**
灌溉梯度(B)	**	**	**	**	**	**
A×B	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注:表中数据为平均值±标准差;同列数字后不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$);*表示 0.05 水平上影响显著;**表示 0.01 水平上影响显著;ns 表示影响不显著。下同。

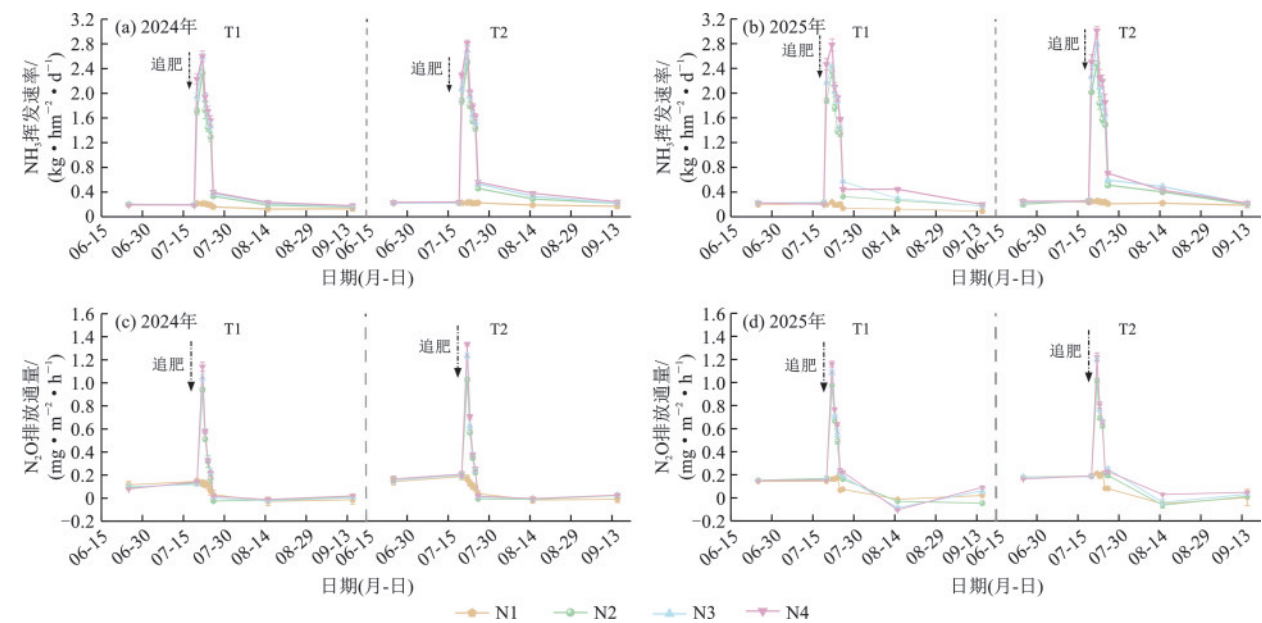


图 7 2024—2025 年不同处理的 NH₃ 挥发速率及 N₂O 排放通量
Fig.7 NH₃ volatilization rate and N₂O emission flux under different treatments (2024—2025)

2.4 灌水及施氮处理对农田 N₂O 排放的影响

由图 7c、图 7d 可知,2024 年、2025 年不同处理 N₂O 排放速率。不同灌溉梯度下,向日葵现蕾期追肥 2 d 后 N₂O 排放通量达到峰值,且均随施氮量的增加而升高。2024 年 N4 处理 N₂O 排放通量峰值较 N3、N2 处理分别增加 9.22%、21.06% (T1), 与 8.09%、30.11% (T2);次年分别增加 6.67%、19.03% (T1) 与 1.81%、19.94% (T2)。相同施氮量时, T2

各处理排放峰值均高于 T1,其中 T2N4 处理排放峰值最高达 1.33 mg/(m²·h)。T2 处理下 N₂O 排放通量峰值较 T1 年均提高 6.67%~14.26%。N₂O 累积排放量亦随施氮量增加而增加(表 2),2 种灌溉梯度下,2 a N4 处理的累计排放量较 N3、N2 在 T1 下分别平均增加 9.32% 与 20.48%,在 T2 下分别平均增加 10.84% 与 21.68%。施氮量相同时, T2 各施肥处理累积排放量均高于 T1 各施肥处理。相较 T1、T2

处理下, N₂O 累计排放量年平均增加 31.41%~32.68%。T2N4 处理的 N₂O 累计排放量最为显著, 其次为 T2N3, 与前述 NH₃ 挥发的损失规律一致, 表明 T2N4 是导致气态氮损失风险最大的水氮调控方案。

2.5 灌水及施氮处理对氮肥气态损失的影响

由表 2 可知, 2024 年、2025 年不同处理的氮肥气态损失率。T2 处理下的氮肥气态损失率均高于 T1 处理, T2 处理的氮肥气态损失率在各施氮水平(N4、N3、N2)下较 T1 处理年平均分别增加 22.34%、

27.72%、10.28%。不同灌溉梯度氮肥气态损失率随施氮量增加而分别降低 31.25%~57.70%、21.87%~47.39%, 与 NH₃ 挥发、N₂O 气体排放量呈相反规律, 氮肥气态损失率是气体损失量与施氮量的比值, 当施氮量大幅增加时, 虽气态损失量增加, 但其增加比例相对较低, 导致氮肥气态损失率降低。表明损失率的降低并不代表环境排放压力的减小, 过量施肥仍导致 NH₃ 与 N₂O 排放总量的显著增加, 加剧环境危害风险, 不能仅依据氮损失率下降而认为可过

表 2 2024—2025 年不同处理的 NH₃ 累计挥发量、N₂O 累计排放量、氮肥气态损失率
Table 2 Cumulative NH₃ volatilization, cumulative N₂O emissions, and gaseous fertilizer nitrogen loss rate under different treatments (2024—2025)

处理	2024 年			2025 年		
	NH ₃ 累计挥发量/ (kg·hm ⁻²)	N ₂ O 累计排放量/ (kg·hm ⁻²)	氮肥气态 损失率/%	NH ₃ 累计挥发量/ (kg·hm ⁻²)	N ₂ O 累计排放量/ (kg·hm ⁻²)	氮肥气态 损失率/%
T1 N2	29.732±1.842 e	1.360±0.037d	9.779±0.260b	32.418±0.795e	2.015±0.156e	11.615±0.386b
T1 N3	32.779±1.931d	1.505±0.010cd	7.675±0.213d	37.377±0.205d	2.211±0.077d	9.614±0.119c
T1 N4	34.394±1.662cd	1.660±0.023c	6.233±0.155e	42.089±0.108c	2.396±0.075c	8.543±0.052d
T2 N2	35.711±1.469c	2.016±0.136b	11.391±0.894a	38.725±1.099d	2.346±0.108cd	12.496±0.711a
T2 N3	38.542±0.954b	2.173±0.219ab	8.675±0.325c	43.767±0.250b	2.618±0.071b	10.253±0.193c
T2 N4	41.415±1.003a	2.320±0.183a	7.326±0.047d	46.338±1.262a	3.009±0.036a	8.479±0.281d
施肥水平(A)	**	**	**	**	**	**
灌溉梯度(B)	**	**	**	**	**	*
A×B	ns	ns	ns	ns	ns	ns

2.6 盐碱地土壤理化性质、施氮量与氮素响应指标的相关性

针对不同处理下, 全生育期的盐碱地土壤水盐、离子组成及施氮量与氮素响应指标进行相关性分析, 以明确水盐因子对氮素去向的影响。结果表明, 土壤含水率和施氮量与气态氮排放速率均呈正相关($r=0.5\sim0.7$), 含水率与氮肥利用率呈负相关, 而施氮量与其呈正相关(图 8)。土壤全盐量与各指标呈正相关但不显著。进一步分析主要离子组成发现, Na⁺、K⁺、HCO₃⁻ 与 N₂O、NH₃ 排放速率及氮肥残留率均呈正相关, 其中 Na⁺、K⁺ 与 N₂O 排放速率相关性较高($r=0.86、0.74$), HCO₃⁻ 与氮肥残留率相关性较高($r=0.82、0.57$), Mg²⁺ 与气态氮排放速率呈负相关, 而 Cl⁻、Ca²⁺ 和 SO₄²⁻ 与各指标无显著一致规律。表明盐分对氮转化的影响不仅与其总量有关, 更取决于其离子组成。以 Na⁺、K⁺ 和 HCO₃⁻ 为主的离子组合是影响氮素气态排放与氮肥残留的关键驱动因子。

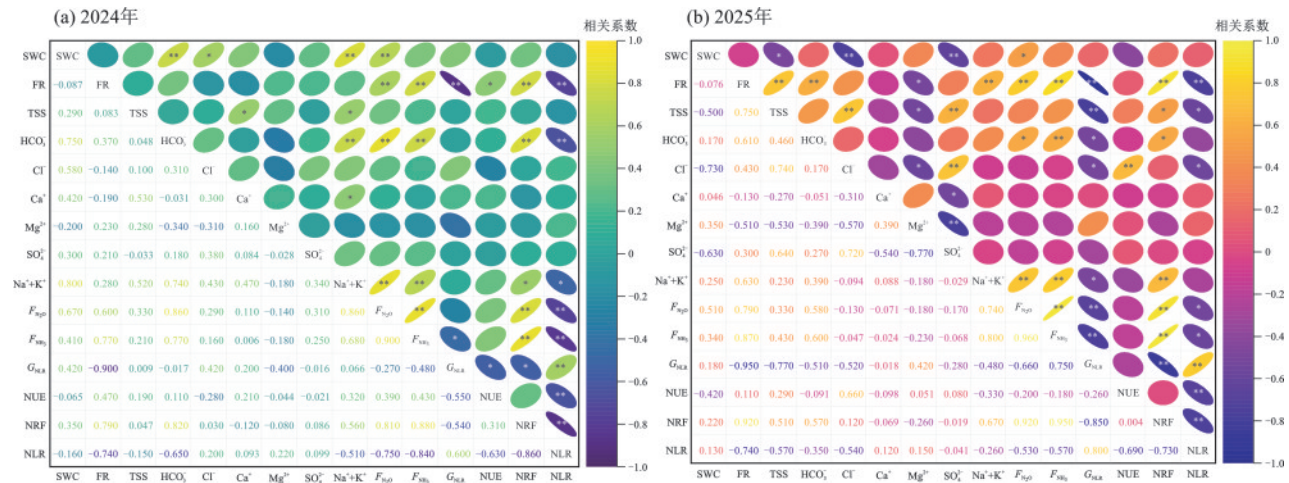
3 讨论

3.1 不同处理对盐碱地土壤氮肥去向的影响

盐碱化土壤中的氮素更易发生淋溶和径流损失, 其氮肥利用效率显著低于非盐碱化土壤, 且氮挥发损失也更为严重^[18]。本研究标记 ¹⁵N 肥料在向日葵中氮肥利用率、残留率、损失率分别为 20.01%~26.10%、30.78%~38.88%、37.54%~47.63%。国世佳等^[19]在内蒙古中西部(非盐碱土)的研究中向日葵的氮肥利用率平均为 34.7%, 反映盐碱胁迫下作物对氮肥吸收利用的抑制影响, 随着土壤盐碱化程度加剧, 氮素转化过程被显著抑制^[20]。因此, 在当前土壤盐碱化范围不断扩大、程度持续加重的背景下, 盐碱土上优化氮肥管理比非盐碱土更为迫切。本研究不施氮肥处理的产量很低, 证实氮素供应对作物生长发育至关重要^[21]; 施加氮肥对向日葵有良好的增产效果, 但过量施肥处理产量并没有继续增加, 且施氮过量降低结实率, 与王学敏等^[22]研究规律一致。施氮量相同时, T1 各处理的氮肥利用率

与产量均优于 T2 各处理,其可能因素是轻度亏缺灌溉降低氮肥淋溶及径流损失,使向日葵对土壤氮素能够更好的吸收利用,因此,提高向日葵的氮肥利用率和产量^[23]。施氮水平对氮肥利用率具有

显著影响($p < 0.01$),本研究中 N3 施氮水平的氮肥利用率高于 N4,是因为氮素供应已满足向日葵的生长需求,继续增施氮肥导致氮素过量,反而降低氮肥利用效率。



注:SWC、FR、TSS、 F_{N_2O} 、 F_{NH_3} 、 G_{NLR} 、NUE、NRF、NLR 分别为土壤含水率、施氮量、土壤全盐量、 N_2O 排放速率、 NH_3 挥发速率、氮肥气态损失率、氮肥利用率、氮肥残留率、氮肥损失率。

图 8 2024—2025 土壤与氮素指标的相关性

Fig.8 Correlation analysis between soil properties and nitrogen indicators (2024—2025)

土壤中残留的肥料氮主要以稳定的有机氮为主,能长效供氮,少量无机氮(铵态氮、硝态氮),是导致环境风险的主要形态^[24-25]。本试验结果表明,不同灌溉模式下,肥料氮残留量随施氮量增加而升高,且主要集中在 0~20 cm 土层,与尹豪杰等^[26]研究结论相似,氮淋溶作用与土壤的物理结构和化学物质含量相关,限制氮的淋溶深度,导致氮素主要残留在表层土壤中^[27]。T1 处理下各施肥处理的肥料氮残留量均低于 T2 施肥处理,可能是因为适当减少灌水量,增强土壤微生物活性和根系活力,提高植物对氮素的吸收作用^[28]。本试验中肥料氮素去向规律表现为氮肥损失率>氮肥残留率>氮肥利用率,与乔天等^[17]研究结果一致,但也存在相异的氮素去向规律;王春晓等^[29]对花生叶面施氮的研究表明,氮肥利用率最高;而丁文成等^[30]结果表明,氮肥残留率是主要去向,说明作物种类、施氮方式与氮肥类型均影响氮素去向。同时 Na^+ 、 K^+ 和 HCO_3^- 盐分离子与氮肥残留率呈显著正相关, Na^+ 、 K^+ 可能通过盐分胁迫抑制作物氮吸收,增加土壤氮库^[31],与试验结果能够正向影响 N_2O 排放相互印证,为 N_2O 产生提供更多底物。 HCO_3^- 造成的高 pH 环境可能通过抑制特定微生物活性,减缓有机氮的矿化速率或促进无机氮的某种形式的固定,从而延长氮在土壤中的残留时间^[32]。2 a 试验中,即便最优处理的氮肥残留率也高于利用率,且残留率持续

增加,为降低肥料堆积对土壤性质的不利影响,后续将深入研究土壤氮素转化及氮肥残留效应,制定精细化施肥方案。

3.2 不同处理对盐碱地土壤气态氮排放的影响

本试验表明,在 2 种灌溉条件下, N_2O 排放通量和 NH_3 挥发速率随着施氮量的增加而提高,是因为氮肥施入后,脲酶水解作用产生大量的 NH_4^+ ,促进氨挥发化学平衡向右进行,随着施氮量逐步递增,土壤中 NH_4^+ 的含量也随之呈上升趋势,二者存在显著正相关,因此 NH_3 挥发速率提高^[33]。已有研究^[34-35]证明,当氮肥水解后的 NH_4^+ 与 NO_3^- 同时存在时,能导致 N_2O 的快速生成。在施氮量相同下,T2 各处理的 NH_3 累积挥发量与 N_2O 累积排放量均高于 T1 各处理,主要因为充分灌溉下土壤孔隙含水量高,氧气扩散受限,形成局部厌氧环境,一方面显著增强反硝化作用,进而促进 N_2O 排放^[36];另一方面,较高的土壤含水率抑制硝化作用,尿素水解产生的 NH_4^+ 转化困难,为 NH_3 挥发提供充足且持久的反应底物,并且本试验区土壤盐碱背景导致的较高 pH,进一步驱动 NH_3 挥发最终呈现土壤含水率与氨挥发正相关的现象^[37]。

相关性分析确定 Na^+ 、 K^+ 和 HCO_3^- 是驱动氮素响应的关键因子,其中 Na^+ 、 K^+ 与土壤胶体竞争吸附 NH_4^+ ,增加 NH_4^+ 的浓度,从而促进 NH_3 挥发^[38],且 Na^+ 可能干扰反硝化的菌群的代谢功能,抑制 N_2O 还

原酶活性^[39],创造利于 N_2O 累积的微环境。 HCO_3^- 作为碱性盐离子,能持续抬升土壤pH,促进 NH_3 挥发^[40]。同时在碱性条件下,经典的反硝化途径可能受到抑制^[41],本研究中, HCO_3^- 与 N_2O 排放速率呈正相关,虽然 HCO_3^- 对部分反硝化微生物活性产生轻微抑制,但施氮量和土壤含水率的增加显著提升 N_2O 的排放效应,是主导排放通量的关键因素。因此,在后续研究中,需在控制施氮量与土壤含水率的条件下,进一步验证盐分离子组成对 N_2O 排放的单一独立影响及其微生物学机制。

4 结论

1) 2种灌溉条件下, N_2O 排放通量和 NH_3 挥发速率随着施氮量的增加而提高, N_4 处理的排放峰值较 N_3 、 N_2 平均增加4.4%~21.4%,氮肥气态损失率随施氮量大幅增加而降低,降低21.87%~57.70%。在施氮量相同下,充分灌溉处理的 NH_3 累积挥发量较轻度亏缺灌溉处理年均增加15.3%~19.8%,而 N_2O 累积排放量显著增加31.4%~32.7%。且T2处理的氮肥气态损失率也相应更高,最高值为12.496%。

2) 残留肥料氮主要集中在0~20 cm土层,占总残留量46.13%~63.14%,不同土层肥料氮残留量随着土层深度增加而递减,产量与氮肥利用率随施氮量增加而增加, N_3 水平最显著。T1处理均优于T2处理,产量提高4.12%~12.38%、氮肥利用率增加8.46%~14.96%,其中2025年T1N3产量与氮肥利用率最高,分别为2 796.01 kg/hm²、26.10%,肥料氮素去向规律表现为氮肥损失率>氮肥残留率>氮肥利用率。

3) 土壤含水率和施氮量与气态氮排放速率均呈正相关($r=0.5\sim0.7$),盐分对氮转化过程影响主要与盐分离子组成有关, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 HCO_3^- 与气态氮排放速率呈正相关($r=0.57\sim0.86$), Na^+ 、 K^+ 主要通过土壤胶体竞争吸附 NH_4^+ ,增加 NH_4^+ 的浓度, HCO_3^- 则通过提高pH促进挥发与硝化过程。

以上结果表明,针对重度盐渍化农田,轻度亏缺灌溉氮肥气态损失率低于充分灌溉,降低氮肥气态累计排放量。该条件下,225 kg/hm²施氮水平(T1N3)下氮肥利用率最为显著,在保证氮肥利用效率的同时,显著降低氮肥残留率与损失率,T1N3处理可作为盐渍化农田水氮调控管理的优化模式。通过该模式优化水氮调控措施,提高氮肥利用效率,减少养分流失和面源污染,推动农业与生态环境的协调发展。

参考文献:

- [1] Fowler D, Coyle M, Skiba U, et al. The global nitrogen cycle in the twenty-first century[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2013, 368(1621): e20130164.
- [2] 杨新泉, 冯锋, 宋长青, 等. 主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(3): 373-376.
Yang Xinquan, Feng Feng, Song Changqing, et al. Fate and efficient use of nitrogen fertilizer in main agroecosystems[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2003, 9(3): 373-376.
- [3] Liu Yize, Zhuang Minghao, Liang Xia, et al. Localized nitrogen management strategies can halve fertilizer use in Chinese staple crop production[J]. *Nature Food*, 2024, 5(10): 825-835.
- [4] 李燕青, 温延臣, 林治安, 等. 不同有机肥与化肥配施对作物产量及农田氮肥气态损失的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(11): 1835-1846.
Li Yanqing, Wen Yanchen, Lin Zhian, et al. Effect of different manures combined with chemical fertilizer on yields of crops and gaseous N loss in farmland[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2019, 25(11): 1835-1846.
- [5] 廖欢, 王方斌, 刘凯, 等. 不同施氮措施配合硝化抑制剂对滴灌棉田土壤 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响[J]. *西北农业学报*, 2020, 29(9): 1378-1388.
Liao Huan, Wang Fangbin, Liu Kai, et al. Effects of nitrogen application combined with nitrification inhibitors on NH_3 volatilization and N_2O emission in drip-irrigated cotton field [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2020, 29(9): 1378-1388.
- [6] Li Yawei, Xu Junzeng, Liu Boyi, et al. Enhanced N_2O production induced by soil salinity at a specific range[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(14): e5169.
- [7] Ramazanoglu E, Almarie V, Suzer M H, et al. Interactive effects of soil salinity and nitrogen fertilizer types on nitrous oxide and ammonia fluxes[J]. *Geoderma Regional*, 2024, 38: e00831.
- [8] Zhu Haiyong, Gan Bo, Xu Jianbo, et al. Effect of soil salinity on nitrogen transformation in soil with nitrogen fertilizer application [J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2023, 21(6): 5625-5642.
- [9] Li Yawei, Xu Junzeng, Liu Shimeng, et al. Salinity-induced concomitant increases in soil ammonia volatilization and nitrous oxide emission[J]. *Geoderma*, 2020, 361: e114053.

- [10] 李洋洋. 苏打盐碱地稻田氨挥发及氮素利用效率研究[D]. 哈尔滨: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2017.
- Li Yangyang. The research on ammonia volatilization and nitrogen use efficiency in saline-sodic paddy fields [D]. Harbin: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [11] 陈思静, 李伏生, 农梦玲. 滴灌追氮管理对宿根蔗田土壤氮组分及 N_2O 排放的影响[J]. 华南农业大学学报, 2023, 44(2): 230-238.
- Chen Sijing, Li Fusheng, Nong Mengling. Effect of nitrogen fertigation management on soil nitrogen fractions and N_2O emissions from ratoon sugarcane fields[J]. Journal of South China Agricultural University, 2023, 44(2): 230-238.
- [12] 张玉娇, 庞桂斌, 余静, 等. 水氮互作对冬小麦农田 NH_3 和 N_2O 排放及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2024, 35(5): 1283-1292.
- Zhang Yujiao, Pang Guibin, Yu Jing, et al. Effects of water-nitrogen interactions on NH_3 and N_2O emissions and yield in winter wheat cropland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(5): 1283-1292.
- [13] 张忠学, 陈鹏, 聂堂哲, 等. 不同水氮调控模式对稻田土壤氮素分布与有效性的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 210-219.
- Zhang Zhongxue, Chen Peng, Nie Tangzhe, et al. Effects of different water and nitrogen regulation models on nitrogen distribution and availability in paddy soils[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 210-219.
- [14] 李志安, 邹碧, 曹裕松, 等. 地面氧化亚氮排放静态箱测定技术[J]. 土壤与环境, 2002, 11(4): 413-416.
- Li Zhian, Zou Bi, Cao Yusong, et al. Technique of static chamber in determining nitrous oxide emission from land surface[J]. Soil and Environmental Sciences, 2002, 11(4): 413-416.
- [15] 曹兵, 高玮, 李洪杰, 等. 控释掺混肥对小麦-玉米轮作体系产量、氮肥利用效率及氨挥发的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(5): 873-885.
- Cao Bing, Gao Wei, Li Hongjie, et al. Effects of blended application of coated and common urea on yield, nitrogen use efficiency and ammonia volatilization in winter wheat-summer maize rotation system[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2024, 30(5): 873-885.
- [16] 李铁成, 张忠学, 张作合, 等. 氮肥减施对节水灌溉稻田 NH_3 与 N_2O 排放及氮肥利用的影响[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 348-355.
- Li Tiecheng, Zhang Zhongxue, Zhang Zuohe, et al. Effects of nitrogen fertilizer reduction under water-saving irrigation on NH_3 , N_2O emissions and absorption of nitrogen fertilizer in black soil paddy fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 348-355.
- [17] 乔天, 刘霞, 杨威, 等. 基于 ^{15}N 同位素示踪盐渍化农田向日葵氮素利用规律[J]. 水土保持学报, 2022, 36(5): 344-350.
- Qiao Tian, Liu Xia, Yang Wei, et al. Nitrogen utilization pattern of sunflower in saline farmland based on ^{15}N isotope tracer[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5): 344-350.
- [18] 许能祥, 董臣飞, 丁成龙, 等. 盐土和非盐土施氮对多花黑麦草增产改质效果差异的比较[J]. 草业学报, 2016, 25(11): 115-123.
- Xu Nengxiang, Dong Chenfei, Ding Chenglong, et al. Comparison of the effects of nitrogen fertilizer on the yield and feeding quality of Italian ryegrass (*Lolium multiflorum*) in saline and non-saline soil[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(11): 115-123.
- [19] 国世佳, 段玉, 张君, 等. 施氮量对食用向日葵产量及品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(2): 126-132.
- Guo Shijia, Duan Yu, Zhang Jun, et al. The effect of nitrogen fertilization on sunflower yield and quality[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019(2): 126-132.
- [20] 杨易, 黄立华, 肖扬, 等. 苏打盐碱化稻田土壤氮素矿化和硝化特征及其影响因子[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(10): 1816-1827.
- Yang Yi, Huang Lihua, Xiao Yang, et al. Characteristics and influencing factors of soil nitrogen mineralization and nitrification in saline-sodic paddy fields[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(10): 1816-1827.
- [21] Zain M, Si Zhuanyun, Ma Haijiao, et al. Developing a tactical irrigation and nitrogen fertilizer management strategy for winter wheat through drip irrigation[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: e1231294.
- [22] 王学敏, 杨雪茹, 张东瑞, 等. 氮肥对向日葵产量及利用率的影响[J]. 种子科技, 2024, 42(8): 14-16.
- Wang Xuemin, Yang Xueru, Zhang Dongrui, et al. Effect of nitrogen fertilizer on yield and utilization rate of sunflower[J]. Seed Science and Technology, 2024, 42(8): 14-16.
- [23] Tian Rongrong, Qi Guangping, Kang Yanxia, et al. Effects of irrigation and nitrogen application on soil water and nitrogen distribution and water-nitrogen utilization of wolfberry in the Yellow River Irrigation Region of Gansu Province, China[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: e1309219.
- [24] Westerman R L, Tucker T C. In situ transformations of nitrogen-15 labeled materials in Sonoran Desert soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1979, 43(1):

- 95-100.
- [25] 陈维梁,高扬,林勇明,等.紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应[J].环境科学,2014,35(6):2129-2138.
Chen Weiliang, Gao Yang, Lin Yongming, et al. Nitrogen leaching and associated environmental health effect in sloping cropland of purple soil [J]. Environmental Science, 2014, 35(6): 2129-2138.
- [26] 尹豪杰,孔丽婷,王荣荣,等.基于 ^{15}N 标记的干旱区滴灌肥料氮的去向和效益研究[J].植物营养与肥料学报,2023,29(3):414-426.
Yin Haojie, Kong Liting, Wang Rongrong, et al. Fate and efficiency of fertilizer nitrogen in spring wheat production under drip irrigation based on the ^{15}N tracing method [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2023, 29(3): 414-426.
- [27] 杨利玲,陈瑞利.土壤氮残留及其生态效应[J].现代农业科技,2010(10):272-273.
Yang Liling, Chen Ruili. Nitrogen residual in soil and its ecological effects [J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2010(10): 272-273.
- [28] 王林权,周春菊.夏玉米水肥异区交替灌溉施肥的产量与环境效应研究进展[J].植物营养与肥料学报,2017,23(6):1651-1658.
Wang Linquan, Zhou Chunju. Advances in researches of yield and environmental effect of alternate furrow irrigation with separated water and N fertilizer supply on summer maize [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(6): 1651-1658.
- [29] 王春晓,郑永美,矫岩林,等.以 ^{15}N 示踪技术分析叶面施氮对花生氮素吸收、分配及利用率的影响[J].中国油料作物学报,2024,46(4):881-888.
Wang Chunxiao, Zheng Yongmei, Jiao Yanlin, et al. Effects of foliar topdressing of labeled urea(^{15}N) on nitrogen absorption, distribution and utilization of peanut [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2024, 46(4): 881-888.
- [30] 丁文成,李书田,黄绍敏.氮肥管理和秸秆腐熟剂对 ^{15}N 标记玉米秸秆氮有效性及去向的影响[J].中国农业科学,2016,49(14):2725-2736.
Ding Wencheng, Li Shutian, Huang Shaomin. Bioavailability and fate of nitrogen from ^{15}N -labeled corn straw as affected by nitrogen management and straw microbial inoculants [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(14): 2725-2736.
- [31] Ahmad I, Zhu Guanglong, Zhou Guisheng, et al. Integrated approaches for increasing plant yield under salt stress [J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: e1215343.
- [32] 马瑞,赵永鹏,王智慧,等.pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响[J].环境科学,2022,43(4):2204-2208.
Ma Rui, Zhao Yongpeng, Wang Zhihui, et al. Effect of pH on the abundance and community structure of comammox nitrospira in paddy soils [J]. Environmental Science, 2022, 43(4): 2204-2208.
- [33] 唐良梁,李艳,李恋卿,等.不同施氮量对稻田氨挥发的影响及阈值探究[J].土壤通报,2015,46(5):1232-1239.
Tang Liangliang, Li Yan, Li Lianqing, et al. Effect of different nitrogen application rate on paddy ammonia volatilization and nitrogen threshold [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(5): 1232-1239.
- [34] De Groot C J, Vermoesen A, Van Cleemput O. Laboratory study of the emission of N_2O and CH_4 from a calcareous soil [J]. Soil Science, 1994, 158(5): 355-364.
- [35] 郑洁敏,钟一铭,戈长水,等.不同施氮水平下水稻田温室气体排放影响研究[J].核农学报,2016,30(10):2020-2025.
Zheng Jiemin, Zhong Yiming, Ge Changshui, et al. Greenhouse gas emissions from paddy field under different nitrogen fertilization rates [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2016, 30(10): 2020-2025.
- [36] Tian Shenzhong, Ning Tangyuan, Zhao Hongxiang, et al. Response of CH_4 and N_2O emissions and wheat yields to tillage method changes in the North China Plain [J]. PLoS One, 2012, 7(12): e51206.
- [37] Yang Wenzhu, Hu Youlin, Song Chunni, et al. Interactive effects of soil moisture, nitrogen fertilizer, and temperature on the kinetic and thermodynamic properties of ammonia emissions from alkaline soil [J]. Atmospheric Pollution Research, 2023, 14(7): e101805.
- [38] Pan Yongchun, She Dongli, Shi Zhenqi, et al. Salinity and high pH reduce denitrification rates by inhibiting denitrifying gene abundance in a saline-alkali soil [J]. Scientific Reports, 2023, 13: e2155.
- [39] Wu Si, Zhang Zhenhua, Sun Haijun, et al. Responses of rice yield, N uptake, NH_3 and N_2O losses from reclaimed saline soils to varied N inputs [J]. Plants, 2023, 12(13): e2446.
- [40] Clough T J, Lanigan G J, de Klein C A M, et al. Influence of soil moisture on codenitrification fluxes from a urea-affected pasture soil [J]. Scientific Reports, 2017, 7: e2185.
- [41] Bueno E, Mania D, Mesa S, et al. Regulation of the emissions of the greenhouse gas nitrous oxide by the soybean endosymbiont *Bradyrhizobium diazoefficiens* [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(3): e1486.