

减氮对华北地区麦玉轮作农田土壤 N₂O 排放调控机理

白芳芳¹, 李平^{1,2,3}, 陆红飞⁴, 李白玉⁵, 齐学斌^{1*}, 毛雯雯^{6*}

(1. 中国农业科学院 农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002; 2. 农业部农产品质量安全水环境因子风险评估实验室, 河南 新乡 453002; 3. 中国农业科学院 河南新乡农业水土环境野外科学观测试验站, 河南 新乡 453002; 4. 江苏农林职业技术学院, 江苏 句容 212400; 5. 青岛工学院, 山东 青岛 266300; 6. 河南省地质局地质灾害防治中心, 郑州 450012)

摘要:【目的】探究减氮对华北地区麦玉轮作农田土壤 N₂O 排放调控机制。【方法】冬小麦季和夏玉米季均以不施氮为对照(CK), 设置2个施氮量, 分别为常规施氮量(纯氮 300 kg/hm², N₂)、减氮 20% (纯氮 240 kg/hm², N₁), 研究施氮量对麦玉轮作农田土壤性质及 N₂O 排放通量影响, 基于逐步回归分析, 研究减氮对麦玉轮作农田土壤 N₂O 排放调控机制。【结果】①减氮有效降低了 N₂O 排放通量, 且夏玉米季 N₂O 排放通量远高于冬小麦季, 夏玉米季由施肥引起的 N₂O 排放量较高。②冬小麦季 N₂O 排放通量与环境因子逐步回归公式为: N₂O 排放通量=181.952+1.450×硝态氮+8.401×铵态氮-0.514×电导率; 硝态氮、铵态氮会对冬小麦季 N₂O 排放通量产生显著的正向影响, 而电导率会对冬小麦季 N₂O 排放通量产生显著的负向影响。③夏玉米季 N₂O 排放通量与环境因子逐步回归公式为: N₂O 排放通量=-354.606+4.592×硝态氮+157.848×铵态氮; 硝态氮、铵态氮会对夏玉米季 N₂O 排放通量产生显著的正向影响。【结论】综上所述, 适量减氮显著降低夏玉米季 N₂O 累积排放量和增温潜势, 应加强夏玉米季农田水肥管理。

关键词: 麦玉轮作; 减氮; N₂O 排放通量; 土壤性质; 逐步回归分析

中图分类号: S512; S513

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023525

白芳芳, 李平, 陆红飞, 等. 减氮对华北地区麦玉轮作农田土壤 N₂O 排放调控机理[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(5): 95-104.
BAI Fangfang, LI Ping, LU Hongfei, et al. Regulating nitrogen fertilization to reduce N₂O emission in wheat-maize rotation farmlands in North China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(5): 95-104.

0 引言

【研究意义】华北地区是我国重要的粮食生产基地, 以冬小麦-夏玉米一年两熟种植模式为主, 该地区常规施肥模式(550~600 kg/(hm²·a))不但没有显著提高作物产量, 反而导致农田 N₂O 排放量和硝酸盐淋失量增加^[1]。与农民常规施氮量相比, 减氮 21%~24% 处理的冬小麦和夏玉米产量增加, 氮肥利用效率和经济效益均增加, 氮损失降低了 156 kg/hm²^[2]。与减氮 20% 处理相比, 农民常规施氮量处理夏玉米和冬小麦土壤全剖面硝态氮存储量分别增加 39.40% 和 35.55%^[3], 且减氮 20% 处理冬小麦和夏玉米水氮利用效率均较高, 因此, 在 2~4 m 地下水埋深区域冬小麦和夏玉米减氮 20% 可行^[4-5]。农田 N₂O 排放量分别占人类活动产生的

N₂O 排放量的 84%^[6]。农业生产中氮肥的大量施用是大气中 N₂O 排放量增加的重要原因之一^[7]; 减氮可有效降低农田 N₂O 排放量、减少农业面源污染^[8]。因此, 研究减氮对冬小麦和夏玉米农田土壤 N₂O 排放差异及调控机制对华北地区农业绿色发展具有重要意义。

【研究进展】施氮量对冬小麦和夏玉米农田土壤 N₂O 排放调控涉及养分管理、土壤微生物和土壤环境条件等多个因素。张志勇等^[9]研究表明, 麦玉轮作农田秸秆还田耕作措施下, 旋耕加减氮是保障冬小麦产量、降低农田 N₂O 排放的有效措施。夏淑洁等^[10]研究表明, 氮肥施用量的增加是 N₂O 排放增加的主要因素, 减少氮肥的施用可以降低土壤中硝态氮量和铵态氮量, 降低了土壤反硝化作用和硝化作用底物, 从而减少 N₂O 的生成。另外, 减氮可能会改变土壤微生物群落结构和代谢活性, 从而影响微生物对氮的转化过程, 进而减少 N₂O 排放。吕金东等^[11]研究表明, N₂O 排放通量与土壤铵态氮量、硝态氮量、*amoA*-AOA 和 *nirK* 基因丰度均显著正相关。减氮显著影响微生物群落组成^[12]; Wang 等^[13]研究表明, 减氮主要是通过影响反硝化细菌的相对丰度来影响 N₂O 的排放。其次, 减氮可能改变土壤的一些环境条件, 如 pH 值、水分状况、

收稿日期: 2023-11-14 修回日期: 2024-02-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800605, 2021YFD1700900); 中国农科院科技创新工程重大任务项目(CAAS-ZDRW202201)

作者简介: 白芳芳(1986-), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事农业水资源与水环境方面的研究。E-mail: baifang0921@163.com

通信作者: 齐学斌(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业水资源优化配置与水资源安全利用方面研究。E-mail: qxb6301@sina.cn

毛雯雯(1986-), 女, 工程师, 硕士, 主要研究方向为土壤和地下水污染调查及修复。E-mail: 342409649@qq.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

温度、土壤结构等；这些变化可能影响土壤中氮转化速率和微生物活性，从而影响 N_2O 的产生和释放。长期施用化肥或施氮量过高会导致土壤酸化^[14]；酸性土壤环境中可利用的有机碳和无机氮较中性和微碱性环境中低，进而导致土壤反硝化速率降低^[15]；而过高的pH值会限制反硝化微生物活性，降低土壤反硝化速率^[16]；故pH值显著影响 N_2O 排放^[17-18]。万伟帆等^[19]研究表明，减氮显著降低了马铃薯农田土壤 N_2O 排放量，且 N_2O 排放量与土壤湿度显著正相关。陈津赛等^[20]研究表明，麦田施氮量的增加会减小耕层土壤水稳性团聚体的平均粒径，降低团聚体的稳定性，增加 N_2O 的排放量。周龙等^[21]研究表明，随着施氮量的增加，马铃薯田土壤 N_2O 排放通量显著增加；低氮处理下土壤 N_2O 排放通量与土壤温度、湿度显著正相关；高氮处理下，土壤 N_2O 排放通量与土壤硝态氮量显著正相关。因此，减氮对 N_2O 排放调控机理可能会因地区、气候和土壤条件的差异而有所不同。【切入点】所以碱性土壤条件下，华北地区麦玉轮作农田土壤 N_2O 排放差异及调控机制尚不清晰。【拟解决的关键

问题】为此，在地中渗透仪观测场开展小区试验，研究减氮对麦玉轮作农田土壤性质及 N_2O 排放影响，揭示减氮对华北地区麦玉轮作农田土壤 N_2O 排放调控机制，为控制农田 N_2O 排放、减少农业面源污染提供一定理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验于 2019 年 10 月—2021 年 10 月在中国农业科学院河南新乡农业水土环境野外科学观测试验站大型地中渗透仪（35°19'N、113°53'E，海拔 73.2 m）进行。试验地多年平均气温 14.1 °C，无霜期 210 d，日照时间 2 398.8 h，多年平均降水量 588.8 mm，降水量年际变化较大，丰水年与枯水年可相差 3~4 倍，7—9 月降水量占全年降水量的 70% 左右，多年平均蒸发量 2 000 mm。试验土壤为粉砂壤土，主要理化性状详见表 1。测坑面积 1.5×3.0 m²，各测坑为带底钢筋混凝土结构。

表 1 供试土壤理化性状

Tab.1 Physical and chemical properties of test soil

土层深度/cm	土壤机械组成/%			体积质量/ (g cm ⁻³)	有机质量/ (g kg ⁻¹)	全氮量/ (g kg ⁻¹)	全磷量/ (g kg ⁻¹)	有效钾量/ (g kg ⁻¹)	EC/ (μS·cm ⁻¹)	pH 值
	<0.002 mm	0.002~0.02 mm	0.02~2.0 mm							
0~20	6.85	52.61	40.54	1.40	14.30	0.32	0.66	0.19	568.90	9.13
20~40	7.49	53.47	39.04	1.41	13.64	0.28	0.56	0.15	679.70	9.06

1.2 试验设计

供试夏玉米 (*Zea mays* L.) 品种为怀玉 208。2019—2021 年均于 6 月上旬播种，9 月下旬收获，全生育期 105~108 d，种植密度均为 6 667 株/hm²。供试冬小麦 (*Triticum aestivum* L.) 品种为百农 4199。2019—2021 年均于 10 月中旬播种，次年 5 月下旬收获，播种量均为 165 kg/hm²。

冬小麦季和夏玉米季均以不施氮为对照 (CK)，设置 2 个施氮量，分别为常规施氮量 (纯氮 300 kg/hm²，当地农民常用量，N2)、减氮 20% (纯氮 240 kg/hm²，N1)，共计 3 个处理，每个处理 4 次重复，共计 12 个小区。在 20 cm 土层处理设 RS-XAJ-100 探头，用于监测土壤水分和指导灌水。用井水灌溉，每次取水时检测水质，灌溉方式为地面灌，土壤含水率低于 55% 田间持水率时灌水。试验用肥为含氮量为 46% 的尿素、含 P₂O₅ 量为 12% 的过磷酸钙、含 K₂O 量为 50% 硫酸钾；P₂O₅ 施入量为 150 kg/hm²，K₂O 施入量为 120 kg/hm²。夏玉米氮肥以底肥和追肥 4:6 的形式施入，底肥于夏玉米播种时施入，追肥于大喇叭口期撒施；冬小麦氮肥以底肥和追肥 6:4 的形式施入，底肥于冬小麦播种时施入，追肥于返青期撒施，其他田间管理措施与当地大田相同。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 N₂O 排放

N_2O 排放通量：采用静态箱-气相色谱法 (static chamber/gas chromatography techniques) 观测夏玉米、冬小麦农田土壤温室气体排放。采样箱由顶箱和底座 (地箱) 组成，采样箱用 PVC 制成，底座用钢板焊接制成。在小区中央埋设采样箱底座，底座面积 400 mm×400 mm，高 200 mm，上方有密封水槽；由于冬小麦行间距小，故冬小麦季底座中间是有作物的；夏玉米季采样箱置于夏玉米行间，且采样箱底座中间无作物。采样箱尺寸为 500 mm×400 mm×400 mm。采样时底座水槽内加水密封，顶箱上端装有搅拌空气的小风扇和气体采集孔。观测频率为夏玉米、冬小麦生长期每周 1 次，施肥和灌水后加测，一般施肥后 1、3、5、7 d 监测，时间均为 08:00—11:00。采集气体时同时监测气温、土壤温度，其中，采用德图温度探针 (Testo, 0560.1110, Freiburg, Germany) 测定土壤温度；采用今明温度探针测定 (JM624, 今明科技有限公司，天津) 采样箱内温度。扣箱后立刻用 60 mL 注射器采集气体，采集时间分别为扣箱后 0、10、20、30 min，准确记录每次采样时间。采样结束后，立即移开采样箱。采样后立即将样品带回实验室分析。气

体样品采用 CA-5 气体样品进样仪进样, 利用 Agilent6820 型气相色谱仪进行分析。

N₂O 排放通量计算式为:

$$F = \rho \times H \times (\Delta c / \Delta t) \times 273 / (273 + T), \quad (1)$$

式中: F 为 N₂O 排放通量 ($\mu\text{g} / (\text{m}^2 \text{h})$); ρ 为 N₂O 标准状态下的密度 ($1.964 \text{ kg} / \text{m}^3$); H 为取样箱高度 (m); $\Delta c / \Delta t$ 为单位时间静态箱内的 N₂O 气体浓度变化率 ($\text{mL} / (\text{m}^3 \text{h})$); T 为测定时箱体内的平均温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

N₂O 累积排放量计算式为:

$$Z = \Sigma[(F_{i+1} + F_i) / 2] \times (D_{i+1} - D_i) \times 24 / 100\,000, \quad (2)$$

式中: Z 为 N₂O 季节累积排放量 (kg / hm^2); F_i 和 F_{i+1} 为分别第 i 次和第 $i+1$ 次采样时 N₂O 平均排放通量 ($\mu\text{g} / (\text{m}^2 \text{h})$); D_i 和 D_{i+1} 分别为第 i 次和第 $i+1$ 次采样时间 (d); N₂O 累积排放量是将 3 次重复的各次观测值按时间间隔加权平均后再进行平均化处理。采用内插法计算相邻 2 次监测之间未监测日期的累积排放量, 然后进行累加即可得到年度气体累积排放量。

N₂O 排放强度指形成单位经济产量 N₂O 排放量, 计算式为:

$$I = Z / Y, \quad (3)$$

式中: I 代表排放强度 (kg / t); Z 为 N₂O 累积排放量 (kg / hm^2); Y 为作物产量 (t / hm^2)。

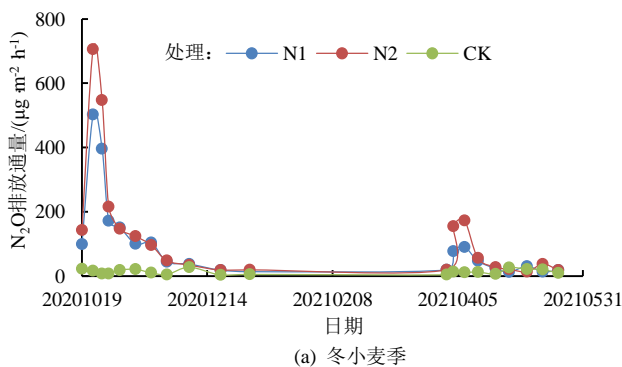
GWP (全球增温潜势) 的计算以 CO₂ 作为参考气体 (GWP 值为 1), 在 100 a 时间尺度气候变化中, N₂O 气体 GWP 值为 298, 其温室效应 ($GWP_s, \text{kg} / \text{hm}^2$, 以 CO₂ 计) 的计算式为:

$$GWP_s = 298 Z / 44 / 28. \quad (4)$$

N₂O 排放系数 (EF_d): IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 将同期内由化肥氮施用引起的 N₂O-N 排放量占总施氮量的百分比定义为 N₂O 排放系数, 并建议化肥氮的 N₂O 排放系数为 1%。计算式为:

$$EF_d = (Z_F - Z_C) / N \times 100, \quad (5)$$

式中: Z_F 与 Z_C 分别代表施肥与不施肥处理条件下 N₂O 的累积排放量 (kg / hm^2); N 表示各处理施氮量 (kg / hm^2)。



1.3.2 土壤性质

分别于采集气体后, 在每个小区用螺旋钻随机采集 0~20 cm 土层 3 个土壤样品, 组成每个小区的复合样品。取回土后一部分装到铝盒里面, 用烘干法测定土壤含水率; 剩余的土样分 2 份, 一份用 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存, 并于 1 周内完成硝态氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 的测定; 另一部分放阴凉处风干, 室温保存, 研磨后过 2 mm 筛子后, 测定土壤 pH 值、电导率 (EC)。其中, 硝态氮和铵态氮采用流动分析仪 ((Bran Luebbe AA3)) 测定; pH 值 ($v_{\text{水}} : m_{\pm} = 2.5 : 1$) 和电导率 ($v_{\text{水}} : m_{\pm} = 5 : 1$) 采用 pH 计、电导率仪测定。

1.4 数据统计与分析

采用 Excel 2010 处理数据和作图; 使用 SPSS19.0 进行方差分析和相关分析。

2 结果与分析

2.1 减氮对麦玉轮作农田土壤 N₂O 排放通量影响

图 1 为冬小麦季和夏玉米季 N₂O 排放通量。由图 1 可知, 冬小麦季分别出现 2 个排放峰值, 均出现在施肥后一周之内, 且冬小麦季 N₂O 排放通量最大峰值出现施基肥后, 返青拔节期追肥后的 N₂O 排放峰值小于冬小麦施基肥后的排放峰值; 随着施氮量的降低, 冬小麦季 N₂O 排放通量整体降低, 极个别时期除外, N2 处理施基肥后的排放峰值比 N1 处理高 40.62%, N2 处理追肥后的排放峰值比 N1 处理高 91.30%; N1、N2 处理施基肥后的排放峰值比追肥时分别高 454.59%、307.66%。夏玉米季分别出现 2 个排放峰值, 均出现在施肥后一周之内, 且夏玉米季 N₂O 排放通量最大峰值出现追肥后, 施基肥后的 N₂O 排放峰值小于夏玉米追肥后的排放峰值; 随着施氮量的降低, 夏玉米季 N₂O 排放通量整体降低, 极个别时期除外, N2 处理施基肥后的排放峰值比 N1 处理高 25.81%, N2 处理追肥后的排放峰值比 N1 处理高 85.56%; N1、N2 处理追肥后的排放峰值比施基肥时分别高 22.23%、80.27%。综上所述可知, 减氮有效降低了 N₂O 排放通量, 且夏玉米季 N₂O 排放通量远高于冬小麦季。

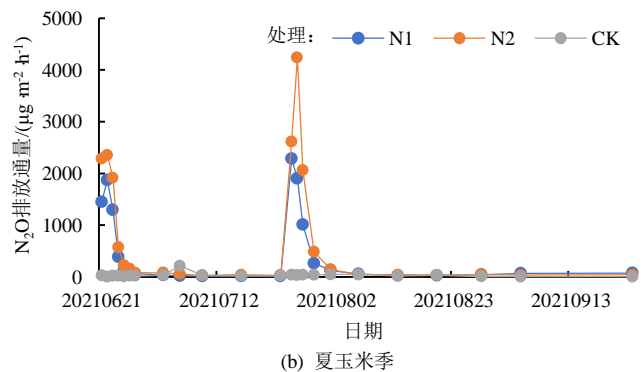


图 1 冬小麦、夏玉米土壤 N₂O 排放通量

Fig.1 N₂O emission fluxes of winter wheat and summer maize

2.2 减氮对麦玉米轮作农田土壤 N₂O 累积排放量、排放强度、增温潜势、排放系数影响

表 2 为冬小麦季和夏玉米季农田土壤 N₂O 累积排放量、排放强度、增温潜势、排放系数。由表 2 可知, CK、N1、N2 处理下夏玉米季农田土壤 N₂O 累积排放量分别比冬小麦季高 30.12%、85.11%、111.26%; 夏玉米季 3 个处理间的土壤 N₂O 累积排放量差异显著, 冬小麦季 N1 处理和 N2 处理显著高于 CK, 且 2 个作物季均表现为 N2 处理>N1 处理>CK。CK、N1、N2 处理下夏玉米季农田土壤 N₂O 排放强

度分别比冬小麦季高 49.33%、115.03%、147.78%; 夏玉米季、冬小麦季 N1 处理和 N2 处理 N₂O 排放强度显著高于 CK, 且均表现为 N2 处理>N1 处理>CK。随着施氮量的增加, 冬小麦季和夏玉米季农田土壤 N₂O 排放系数增加, 本研究中冬小麦季土壤 N₂O 排放系数均小于 1%, 小于 IPCC 排放系数 1% 的推荐值; 但是夏玉米季土壤 N₂O 排放系数均大于 1%, 说明由施肥引起的 N₂O 排放量较高。综上可知, 减氮可有效降低农田土壤 N₂O 排放量, 应加强夏玉米季农田水肥管理。

表 2 各处理土壤 N₂O 累积排放量、排放强度、增温潜势、排放系数

Tab.2 Total N₂O emission, emission intensity, warming potential and emission coefficient of different treatment

处理	Z/(kg hm ⁻²)		I/(kg t ⁻¹)		GWP ₁₀₀ /(kg hm ⁻²)		EF _d /%	
	冬小麦季	夏玉米季	冬小麦季	夏玉米季	冬小麦季	夏玉米季	冬小麦季	夏玉米季
CK	0.45±0.21b	0.58±0.13c	0.12±0.04b	0.17±0.04b	208.91±96.25b	271.84±60.84c	-	-
N1	2.22±0.16a	4.12±0.69b	0.22±0.01a	0.47±0.07a	1 041.05±72.76a	1 927.10±324.56b	0.74	1.53
N2	2.71±0.13a	5.72±0.20a	0.25±0.02a	0.62±0.05a	1 268.51±60.53a	2 679.84±95.42a	0.75	1.76

注 表中同列不同小写字母表示各处理间在 P<0.05 水平下差异显著, 下同。

2.3 冬小麦、夏玉米生育期内环境因子变化

2.3.1 冬小麦、夏玉米生育期内空气温度变化

图 2 为冬小麦、夏玉米生育期内空气温度变化。由图 2(a)可知, 冬小麦生育期内空气温度波动较大, 且 2020 年 1 月 2 日停止监测气体排放后并未监测空

气温度, 所以此期间图 2 中显示的数值不代表此期间温度实际值。由图 2 (b) 可知, 夏玉米生育期内温度较高, 温度变化不大, 主要介于 29.2~37.8 °C。由于监测时间不同, 所以各处理之间的空气温度略有差异。

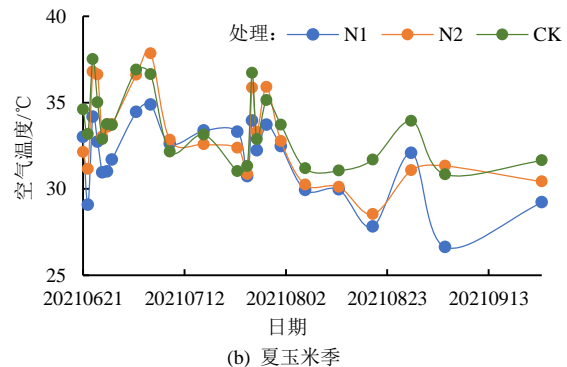
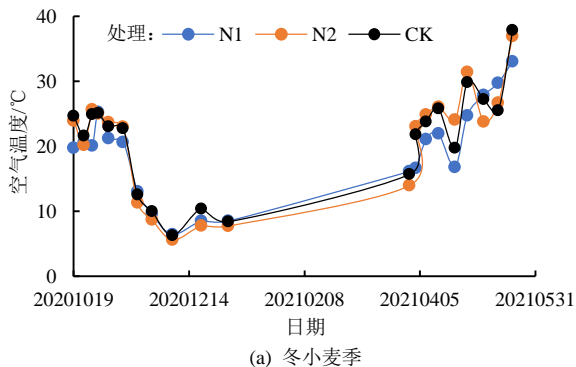


图 2 冬小麦、夏玉米生育期内空气温度变化

Fig.2 Variation of air temperature during the growth period of winter wheat and summer maize

2.3.2 冬小麦、夏玉米生育期内土壤温度变化

图 3 为冬小麦、夏玉米生育期内土壤温度变化。由图 3(a)可知, 冬小麦生育期内土壤温度波动较大, 且 2020 年 1 月 2 日停止监测气体排放后并未监测土壤温度, 所以此期间图 3 中显示的数值不代表此期间土壤温度实际值。由图 3 (b) 可知, 夏玉米生育期内土壤温度较高, 温度变化不大, 主要介于 19.9~34.6 °C。由于监测时间不同, 所以各处理之间的土壤温度略有差异。

以此期间图 4 中显示的数值不代表此期间土壤硝态氮量实际值。基肥及追肥后, 土壤硝态氮量均是在一周之内达到最高值, 之后呈整体降低趋势, 期间每次波动上升均与灌水有关。3 个处理中, 随着施氮量的增加, 各时期土壤硝态氮量整体增加。冬小麦季生育期末 CK、N1、N2 处理土壤硝态氮较生育期初升高了 -61.85%、73.50%、44.68%。

2.3.3 冬小麦、夏玉米生育期内 0~20 cm 土层土壤硝态氮量变化

图 4 为冬小麦、夏玉米生育期内土壤硝态氮量变化。由图 4 (a) 可知, 冬小麦生育期土壤硝态氮量主要与施肥时间及灌水时间相关, 且 2020 年 1 月 2 日停止监测气体排放后并未监测土壤环境因子指标, 所

由图 4 (b) 可知, 夏玉米生育期土壤硝态氮量主要与施肥时间及灌水时间相关。基肥及追肥后, 土壤硝态氮量均是在一周之内达到最高值, 之后呈整体降低趋势, 期间每次波动上升均与灌水有关。3 个处理中, 随着施氮量的增加, 各时期土壤硝态氮量整体增加。夏玉米季生育期末 CK、N1、N2 处理土壤硝态氮量较冬小麦生育期末降低了 22.83%、85.78%、63.5%。

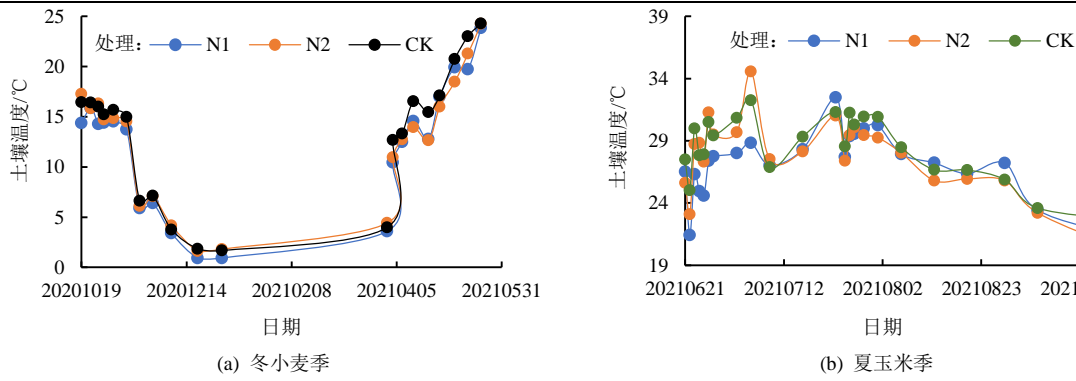


图 3 冬小麦、夏玉米生育期内 0~5 cm 土层土壤温度变化

Fig.3 Variation of soil temperature in 0-5 cm soil layer during the growth period of winter wheat and summer maize

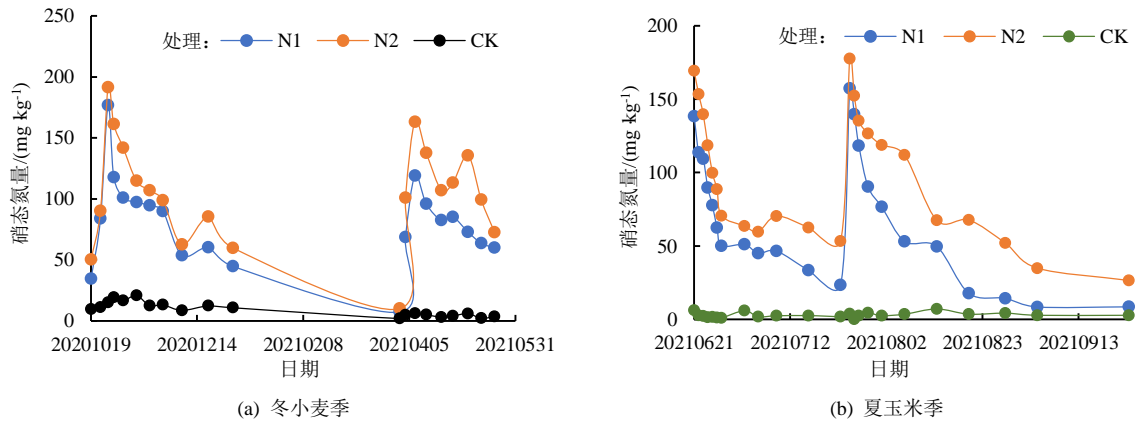


图 4 冬小麦、夏玉米生育期内 0~20 cm 土层土壤硝态氮量变化

Fig.4 Variation of soil nitrate nitrogen in 0-20 cm soil layer during the growth period of winter wheat and summer maize

2.3.4 冬小麦、夏玉米生育期内 0~20 cm 土层土壤铵态氮量变化

图 5 为冬小麦、夏玉米生育期内土壤铵态氮量变化。由图 5 (a) 可知，冬小麦生育期土壤铵态氮量主要与施肥时间及灌水时间相关，且 2020 年 1 月 2 日停止监测气体排放后并未监测土壤环境因子指标，所以此期间图 5 中显示的数值不代表此期间土壤铵态氮量实际值。基肥及追肥后，随着生育期推进，土壤铵态氮量呈整体降低趋势，期间每次波动上升均与灌水有关。3 个处理中，随着施氮量的增加，基肥及追肥后减氮显著降低了土壤铵态氮量，但之后随着生育

期推进，施氮量对各处理土壤铵态氮量影响较小。冬小麦季生育期末 CK、N1、N2 处理土壤铵态氮量较生育期初降低了-37.95%、76.98%、81.63%。

由图 5 (b) 可知，夏玉米生育期土壤铵态氮量主要与施肥时间及灌水时间相关。基肥及追肥后，随着生育期推进，土壤铵态氮量呈整体降低趋势，期间每次波动上升均与灌水有关。随着施氮量的增加，基肥及追肥后减氮显著降低了土壤铵态氮量，但之后随着生育期推进，施氮量对各处理土壤铵态氮量影响较小。夏玉米季生育期末 CK、N1、N2 处理土壤铵态氮量较冬小麦季生育期末增加了 101.24%、177.22%、43.24%。

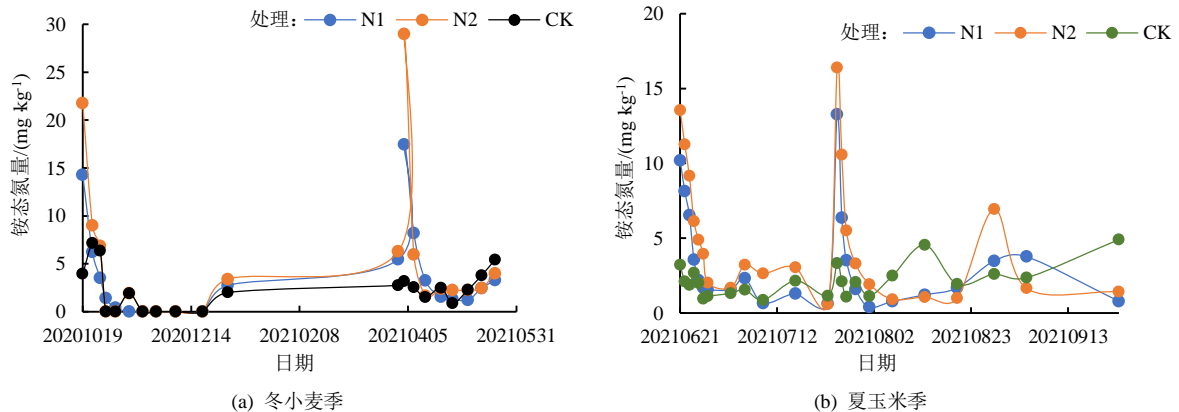


图 5 冬小麦、夏玉米生育期内 0~20 cm 土层土壤铵态氮量变化

Fig.5 Variation of ammonium nitrogen content in 0-20 cm soil layer during the growth period of winter wheat and summer maize

2.3.5 冬小麦、夏玉米生育期内 0~20 cm 土层土壤 *WFPS* 变化

图 6 为冬小麦、夏玉米生育期内土壤 *WFPS* 变化。由图 6 (a) 可知, 冬小麦生育期土壤 *WFPS* 主要与灌水时间相关, 且 2020 年 1 月 2 日停止监测气体排放后并未监测土壤环境因子指标, 所以此期间图 6 中显示的数值不代表此期间土壤 *WFPS* 实际值。苗期及越冬期随着生育期推进, 土壤 *WFPS* 呈整体降低趋势; 返青拔节期—成熟期, 受灌水影响, 期间每次波动上升均与灌水有关。3 个处理中, 随着施氮量的增加, 基肥及追肥后减氮显著降低了土壤 *WFPS*, 但之后随

着生育期推进, 施氮量对各处理土壤 *WFPS* 影响较小。冬小麦季生育期末 CK、N1、N2 处理土壤 *WFPS* 较生育期初降低了 33.57%、50.94%、59.34%。

由图 6 (b) 可知, 夏玉米生育期土壤 *WFPS* 主要与灌水时间相关。整个生育期内, 夏玉米季土壤 *WFPS* 波动变化较大。随着施氮量的增加, 基肥及追肥后减氮显著降低了土壤 *WFPS*, 这可能与作物蒸腾及棵间蒸发相关。夏玉米季生育期末 CK、N1、N2 处理土壤 *WFPS* 较夏玉米生育期初降低了 28.94%、36.84%、27.82%。

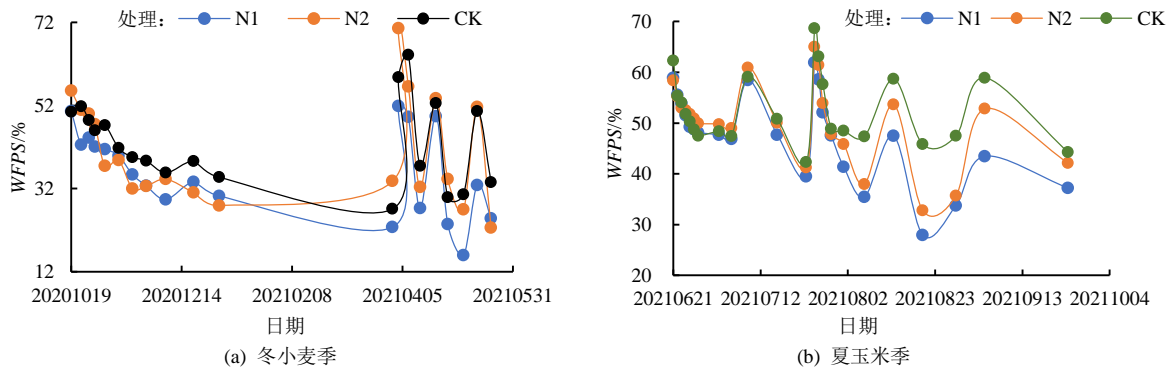


图 6 冬小麦、夏玉米生育期内 0~20 cm 土层土壤 *WFPS* 变化

Fig.6 Variation of soil *WFPS* in 0-20 cm soil layer during the growth period of winter wheat and summer maize

2.3.6 冬小麦、夏玉米生育期内 0~20 cm 土层土壤 pH 值变化

图 7 为冬小麦、夏玉米生育期内土壤 pH 值变化。由图 7 (a) 可知, 冬小麦越冬期土壤 pH 值整体呈升高趋势, 返青拔节期—成熟期, 土壤 pH 值整体呈降低趋势, 且 2020 年 1 月 2 日停止监测气体排放后并未监测土壤环境因子指标, 所以此期间图 7 中显示的数值不代表此期间土壤 pH 值实际值。3 个处理中,

CK 土壤 pH 值最高; 减氮整体上增加了土壤 pH 值(个别除外)。冬小麦季生育期末 CK、N1、N2 处理土壤 pH 值较生育期初增加了 1.90%、5.18%、2.40%。

由图 7 (b) 可知, 整个生育期内, 夏玉米季土壤 pH 值波动变化略大。减氮整体上增加了土壤 pH 值。夏玉米季生育期末 CK、N1、N2 处理土壤 pH 值较夏玉米生育期初降低了 0.28%、-1.92%、2.46%。

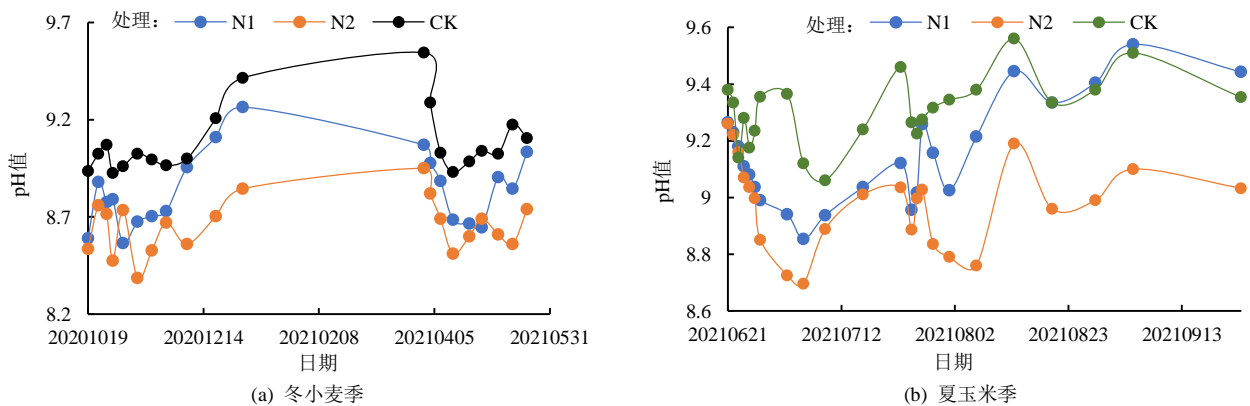


图 7 冬小麦、夏玉米生育期内 0~20 cm 土层土壤 pH 值变化

Fig.7 Variation of soil pH value in 0-20 cm soil layer during the growth period of winter wheat and summer maize

2.3.7 冬小麦、夏玉米生育期内 0~20 cm 土层土壤电导率变化

图 8 为冬小麦、夏玉米生育期内土壤电导率变化。由图 8 (a) 可知, 冬小麦越冬期土壤电导率整体呈降低趋势, 返青拔节期—成熟期, 土壤电导率整体呈升

高趋势, 且 2020 年 1 月 2 日停止监测气体排放后并未监测土壤环境因子指标, 所以此期间图 8 中显示的数值不代表此期间土壤电导率实际值。3 个处理中, N2 处理土壤电导率最高; 减氮整体上降低了土壤电导率(个别除外)。冬小麦季生育期末 CK、N1、N2 处理土

壤电导率较生育期初降低了 22.93%、27.89%、22.17%。

由图 8 (b) 可知，整个生育期内，夏玉米季土壤电导率整体呈先升高后降低的趋势。减氮整体上增

加了土壤电导率，CK 土壤电导率最低。夏玉米季生育期末 CK、N1、N2 处理土壤电导率较夏玉米生育期初增加了 4.18%、21.06%、2.46%。

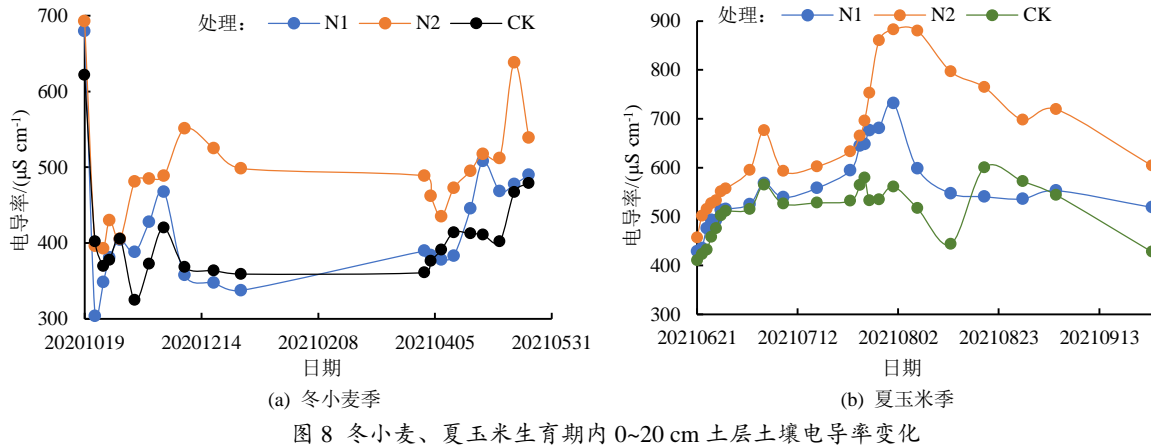


Fig.8 Variation of soil conductivity in 0-20 cm soil layer during the growth period of winter wheat and summer maize

2.4 N₂O 排放通量与环境因子相关分析及逐步回归分析

环境因子与 N₂O 排放通量相关分析表明 (表 3)，冬小麦季 N₂O 排放通量与土壤硝态氮量极显著正相关，与土壤铵态氮量、WFPS 显著正相关，与土壤 pH 值显著负相关，与其他因子相关性不显著。夏玉米季 N₂O 排放通量与土壤硝态氮量、铵态氮量极显著正相关，与 WFPS 显著正相关，与其他因子相关性不显著。

将土壤温度、WFPS、空气温度、铵态氮、硝态氮、pH 值、电导率作为自变量，而将 N₂O 排放通量作为因变量进行逐步回归分析。表 4 为冬小麦季 N₂O

排放通量与环境因子逐步回归结果。经过模型自动识别，最终余下硝态氮、铵态氮、电导率 3 项在模型中，R² 值为 0.432，意味着硝态氮、铵态氮、电导率可以解释 N₂O 排放通量的 43.2% 变化原因。而且模型通过 F 检验 (p<0.05)，说明模型有效。模型公式为：N₂O 排放通量=181.952+1.450×硝态氮+8.401×铵态氮-0.514×电导率。由模型回归系数及显著性检验结果可知，硝态氮、铵态氮会对冬小麦季 N₂O 排放通量产生显著的正向影响，而电导率会对冬小麦季 N₂O 排放通量产生显著的负向影响。

表 3 冬小麦、夏玉米季 N₂O 排放通量与环境因子 Pearson 相关分析

Tab.3 Correlation analysis between N₂O emission fluxes and environmental factors in winter wheat and summer maize seasons

作物	土壤温度	空气温度	硝态氮量	铵态氮量	pH 值	电导率	WFPS
冬小麦	0.146	0.084	0.531**	0.263*	-0.289*	-0.171	0.284*
夏玉米	-0.054	0.075	0.749**	0.848**	-0.125	0.078	0.458**

注 表中*表示在 p<0.05 水平显著相关，**表示在 p<0.01 水平极显著相关，下同。

表 4 冬小麦季 N₂O 排放通量与环境因子逐步回归分析

Tab.4 Step regression analysis of N₂O emission flux and environmental factors in winter wheat season

指标	非标准化系数		标准化系数	t	p	VIF
	B	标准误	Beta			
常数	181.952	75.691	-	2.404	0.020*	-
硝态氮	1.450	0.267	0.550	5.438	0.000**	1.010
铵态氮	8.401	2.678	0.328	3.137	0.003**	1.076
电导率	-0.514	0.173	-0.311	-2.968	0.004**	1.085
R ²	0.432					
调整 R ²	0.401					
F	F(3,56)=14.185, p=0.000					
D-W 值	0.991					

将土壤温度、空气温度、硝态氮、铵态氮、pH 值、电导率、WFPS 作为自变量，而将 N₂O 排放通量作为因变量进行逐步回归分析，表 5 为夏玉米季 N₂O 排放通量与环境因子逐步回归结果。经过模型自动识别，最终余下硝态氮、铵态氮 2 项在模型中，R² 值为

0.760，意味着硝态氮、铵态氮可以解释 N₂O 排放通量的 76.0% 变化原因。而且模型通过 F 检验 (p<0.05)，说明模型有效。模型公式为：N₂O 排放通量=-354.606+4.592×硝态氮+157.848×铵态氮。由模型回归系数及显著性检验结果可知，硝态氮、铵态氮会对夏玉米季 N₂O 排放通量产生显著的正向影响。

表 5 夏玉米季 N₂O 排放通量与环境因子逐步回归分析

Tab.5 Step regression analysis of N₂O emission flux and environmental factors in summer maize season

指标	非标准化系数		标准化系数	t	p	VIF
	B	标准误	Beta			
常数	-354.606	75.923	-	-4.671	0.000**	-
硝态氮	4.592	1.368	0.290	3.357	0.001**	2.052
铵态氮	157.848	21.273	0.641	7.420	0.000**	2.052
R ²	0.760					
调整 R ²	0.753					
F	F(2,66)=104.669, p=0.000					
D-W 值	1.469					

3 讨论

3.1 减氮对冬小麦季和夏玉米季 N_2O 排放影响

氮肥减施可有效降低 N_2O 排放峰值和 N_2O 排放量^[22]。本研究表明, 减氮有效降低了冬小麦和夏玉米季 N_2O 排放通量和 N_2O 排放峰值, 这与前人^[18]研究一致, 主要是因为减氮有效降低了土壤硝化和反硝化作用底物, 进而有效降低了 N_2O 排放通量。本研究中冬小麦季 N_2O 排放峰值远低于夏玉米季, 且夏玉米季 N_2O 累积排放量高于冬小麦季。这主要是因为冬小麦施肥时没有灌水, 偏低的土壤含水率限制了土壤反硝化作用^[23]; 另外, 冬小麦生育期施肥和追肥后土壤温度较低, 限制了土壤硝化和反硝化微生物活动和氮循环过程^[24], 虽然拔节期后土壤温度逐渐升高, 但土壤中氮肥残留量降低, 故灌水后并未造成 N_2O 大量排放, 这说明 N_2O 排放通量不仅与施肥量有关, 还与施肥后的土壤水分状况、土壤温度及微生物活性等^[25]有关。本研究表明, 随着施氮量的增加, 冬小麦季和夏玉米季农田土壤 N_2O 排放系数增加; 冬小麦季土壤 N_2O 排放系数均小于 1%, 但是夏玉米季土壤 N_2O 排放系数均大于 1%, 说明由夏玉米季由施肥引起的 N_2O 排放量较高。因此, 应加强夏玉米季农田水肥管理, 可施用缓释肥或者氮肥分多次施用以提高夏玉米氮肥利用效率, 有效降低硝酸盐淋溶损失和 N_2O 排放。故通过合理管理和调控氮肥的施用量, 减少冬小麦和夏玉米的氮素输入量, 提高作物氮肥利用效率, 减少土壤中氮素的残留量, 进而降低农田土壤 N_2O 的排放。

3.2 减氮对麦玉轮作农田土壤 N_2O 排放通量调控机理

N_2O 排放受多种因素影响, 如氮肥施用量^[26]、作物类型^[27]、耕作措施^[28-29]、土壤含水率^[30]、土壤温度、土壤有机质量^[31]、土壤 pH 值^[32]、土壤含盐量^[16]、土壤溶氧量^[33]、土壤质地^[34]等, 通常这些因素相互关联, 且其影响效果因环境条件和土壤特性的不同而有所差异。因此, 在实际应用中, 需要综合考虑这些因素, 并针对具体情况采取相应的措施来减少 N_2O 排放。本研究表明, 冬小麦季 N_2O 的排放通量主要与硝态氮、铵态氮、土壤电导率相关, 其中硝态氮量、铵态氮量对 N_2O 排放通量产生正效应, 土壤电导率主要对 N_2O 排放产生负效应。这与前人^[16,35]研究一致, 这主要是因为硝态氮和铵态氮是土壤反硝化作用和硝化作用的底物, 二者含量影响土壤反硝化潜势和硝化潜势, 进而影响 N_2O 的排放通量; 另外, 土壤盐分过高会抑制反硝化功能微生物丰度, 进而降低土壤反硝化速率, 抑制土壤 N_2O 排放。土地利用类型也会

影响土壤 N_2O 排放^[27], 这主要是因为不同作物根系分泌物不同, 不仅直接影响土壤微生物的生长繁殖, 而且还影响土壤微生物的群落结构^[36], 并且作物氮肥利用效率以及作物对水肥的需求量和偏好也有差异; 其次作物根系分泌物可以通过调节土壤 pH 值、养分含量、有机质分解和土壤微生物活性^[37-39], 进而影响土壤生化反应; 另外, 气候条件也是影响农田土壤 N_2O 排放的主要因素^[40]。本研究表明, 夏玉米季 N_2O 排放通量主要受土壤硝态氮量和铵态氮量影响, 二者可以解释 N_2O 排放通量 76.0% 的变化原因, 这主要是因为夏玉米生长周期短, 作物生长比较快, 对水肥需求高, 其生长季气温较高, 且气温变幅较小, 故此时土壤硝态氮量和铵态氮量为夏玉米季 N_2O 排放通量主要影响因素; 另外, pH 值与冬小麦、夏玉米季碱性农田土壤 N_2O 排放通量均负相关, 这主要是因为过高的土壤 pH 值会抑制 *nirS*、*nirK*、*nosZ* 反硝化基因丰度, 同时还降低了反硝化过程中的底物进而降低反硝化速率^[16]。另外, 冬小麦、夏玉米季 N_2O 排放通量与 *WFPS* 分别显著和极显著正相关, 这与前人^[23]研究一致, 即 *WFPS* 与 N_2O 排放通量呈二次函数关系, 当 *WFPS* 位于 75%~90% 时, N_2O 排放通量最大, 而本研究中旱作农田土壤 *WFPS* 均小于 75%, 故 *WFPS* 与 N_2O 排放通量正相关。因此, 减少农田氮肥施量和适度水分管理等措施均可以有效降低旱作碱性农田土壤 N_2O 排放。

4 结论

1) 减氮有效降低了 N_2O 排放通量, 且夏玉米季 N_2O 排放通量远高于冬小麦季, 夏玉米季由施肥引起的 N_2O 排放量较高, 应加强夏玉米季农田水肥管理。

2) 冬小麦季 N_2O 排放通量与环境因子逐步回归公式为: N_2O 排放通量 = 181.952 + 1.450 × 硝态氮 + 8.401 × 铵态氮 - 0.514 × 电导率; 硝态氮、铵态氮会对冬小麦季 N_2O 排放通量产生显著的正向影响, 而电导率会对冬小麦季 N_2O 排放通量产生显著的负向影响。

3) 夏玉米季 N_2O 排放通量与环境因子逐步回归公式为: N_2O 排放通量 = -354.606 + 4.592 × 硝态氮 + 157.848 × 铵态氮; 硝态氮、铵态氮会对夏玉米季 N_2O 排放通量产生显著的正向影响。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] JU Xiaotang, XING Guangxi, CHEN Xinping, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(9): 3 041-3 046.
- [2] PENG Z P, LIU Y N, LI Y C, et al. Responses of nitrogen utilization and apparent nitrogen loss to different control measures in the wheat

- and maize rotation system[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 160.
- [3] BAI F F, QI X B, LI P, et al. Groundwater depth and nitrogen application amount jointly regulate the water and residual soil nitrate accumulation in agricultural soil profile[J]. *Agronomy*, 2023, 13(4): 1 163.
- [4] 白芳芳, 乔冬梅, 李平, 等. 地下水埋深和施氮量对夏玉米灌浆特性及水氮利用效率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(6): 90-99.
BAI Fangfang, QIAO Dongmei, LI Ping, et al. Effects of groundwater depth and nitrogen application rate on grain filling characteristics and water and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(6): 90-99.
- [5] 白芳芳, 李平, 乔冬梅, 等. 地下水埋深和施氮量对冬小麦灌浆及水氮利用的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2022, 40(12): 1 275-1 283.
BAI Fangfang, LI Ping, QIAO Dongmei, et al. Effects of groundwater depth and nitrogen application rate on grain filling and water and nitrogen use efficiency of winter wheat[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2022, 40(12): 1 275-1 283.
- [6] IPCC. Climate change 2013: The Physical Science Basis: Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [7] 范靖尉, 白晋华, 任寰宇, 等. 减氮和施生物炭对华北夏玉米-冬小麦田土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响[J]. *中国农业气象*, 2016, 37(2): 121-130.
FAN Jingwei, BAI Jinhua, REN Huanyu, et al. Effects of reducing nitrogen and biochar application on CO₂ and N₂O emissions from summer maize-winter wheat field in North China[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2016, 37(2): 121-130.
- [8] BHANDARI M, MA Y, MEN M X, et al. Response of winter wheat yield and soil N₂O emission to nitrogen fertilizer reduction and nitrapyrin application in North China Plain[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2020, 51(4): 554-565.
- [9] 张志勇, 于旭昊, 熊淑萍, 等. 耕作方式与氮肥减施对黄褐土麦田土壤酶活性及温室气体排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(2): 418-428.
ZHANG Zhiyong, YU Xuhao, XIONG Shuping, et al. Effects of tillage methods and nitrogen fertilizer reduction on soil enzyme activities and greenhouse gas emissions of wheat yellow cinnamon soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(2): 418-428.
- [10] 夏淑洁, 刘闯, 袁晓良, 等. 不同钾水平及氮形态差异对土壤氨挥发和氧化亚氮排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(5): 1 122-1 129.
XIA Shujie, LIU Chuang, YUAN Xiaoliang, et al. Effects of different nitrogen and potassium levels and nitrogen forms on soil ammonia volatilization and nitrous oxide emissions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(5): 1 122-1 129.
- [11] 吕金东, 张丽媛, 虞娜, 等. 水氮耦合对设施土壤 N₂O 和 NO 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(6): 1 366-1 376.
LYU Jindong, ZHANG Liyuan, YU Na, et al. Interactive effects of irrigation and nitrogen on N₂O and NO emissions from greenhouse soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(6): 1 366-1 376.
- [12] BAI F F, GUO W, LI P, et al. Different responses of abundant and rare bacterial composition to groundwater depth and reduced nitrogen application in summer maize field[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1 220 731.
- [13] WANG Y Y, QI L, HUANG R, et al. Characterization of denitrifying community for application in reducing nitrogen: A comparison of *nirK* and *nirS* gene diversity and abundance[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2020, 192(1): 22-41.
- [14] 唐贤, 梁丰, 徐明岗, 等. 长期施用化肥对农田土壤 pH 影响的整合分析[J]. *吉林农业大学学报*, 2020, 42(3): 316-321.
TANG Xian, LIANG Feng, XU Minggang, et al. A Meta-analysis of effects of long-term application of chemical fertilizer on pH of farmland soil[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2020, 42(3): 316-321.
- [15] 王海涛, 郑天凌, 杨小茹. 土壤反硝化的分子生态学研究进展及其影响因素[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(10): 1 915-1 924.
WANG Haitao, ZHENG Tianling, YANG Xiaoru. Molecular ecology research progress for soil denitrification and research status for its influencing factors[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(10): 1 915-1 924.
- [16] PAN Y C, SHE D L, SHI Z Q, et al. Salinity and high pH reduce denitrification rates by inhibiting denitrifying gene abundance in a saline-alkali soil[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 2 155.
- [17] 李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 等. 水肥管理对热带地区双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42(7): 3 458-3 471.
LI Jinqu, SHAO Xiaohui, GOU Guanglin, et al. Effects of water and fertilization management on CH₄ and N₂O emissions in double-rice paddy fields in tropical regions[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(7): 3 458-3 471.
- [18] 潘亚男, 王娅静, 曹文超, 等. 土壤 pH 影响氧化亚氮(N₂O)排放的研究进展[J]. *安徽农学通报*, 2017, 23(15): 19-24, 99.
PAN Yanan, WANG Yajing, CAO Wencao, et al. A review of the influence of soil pH on nitrous oxide(N₂O) emission[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2017, 23(15): 19-24, 99.
- [19] 万伟帆, 李斐, 红梅, 等. 氮肥用量和脲酶抑制剂对滴灌马铃薯田氧化亚氮排放和氨挥发的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(3): 693-702.
WAN Weifan, LI Fei, HONG Mei, et al. Effects of nitrogen rate and urease inhibitor on N₂O emission and NH₃ volatilization in drip irrigated potato fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(3): 693-702.
- [20] 陈津赛, 孙玮皓, 王广帅, 等. 不同施氮量对麦田土壤水稳性团聚体和 N₂O 排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(11): 3 961-3 968.
CHEN Jinsai, SUN Weihao, WANG Guangshuai, et al. Effects of different nitrogen application rates on soil water stable aggregates and N₂O emission in winter wheat field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(11): 3 961-3 968.
- [21] 周龙, 龙光强, 汤利, 等. 综合产量和土壤 N₂O 排放的马铃薯施氮量分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(2): 155-161.
ZHOU Long, LONG Guangqiang, TANG Li, et al. Analysis on N application rates considering yield and N₂O emission in potato production[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(2): 155-161.
- [22] 李铁成, 张忠学, 张作合, 等. 氮肥减施对节水灌溉稻田 NH₃ 与 N₂O 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 NH₃, N₂O 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.
- [23] SHANG F Z, REN S M, YANG P L, et al. Effects of different irrigation water types, N fertilizer types, and soil moisture contents on N₂O emissions and N fertilizer transformations in soils[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2016, 227(7): 225.
- [24] LAI T V, FARQUHARSON R, DENTON M D. High soil temperatures alter the rates of nitrification, denitrification and associated N₂O emissions[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(5): 2 176-2 189.
- [25] 王玉英, 李晓欣, 董文旭, 等. 华北平原农田温室气体排放与减排综述[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(2): 167-174.
WANG Yuying, LI Xiaoxin, DONG Wenxu, et al. Review on greenhouse gas emission and reduction in wheat-maize double cropping system in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(2): 167-174.
- [26] LIU B Y, LIN B J, LI X X, et al. Appropriate farming practices of summer maize in the North China Plain: Reducing nitrogen use to promote sustainable agricultural development[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 175: 105 889.
- [27] ANSARI J, UDAWATTA R P, ANDERSON S H. Soil nitrous oxide emission from agroforestry, rowcrop, grassland and forests in North America: A review[J]. *Agroforestry Systems*, 2023, 97(8): 1 465-1 479.
- [28] 张黛静, 胡晓, 马建辉, 等. 耕作和培肥对豫中区小麦-玉米轮作系统土壤氮平衡和温室气体排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(5): 1 753-1 760.
ZHANG Daijing, HU Xiao, MA Jianhui, et al. Effects of tillage and fertility on soil nitrogen balance and greenhouse gas emissions of

- wheat-maize rotation system in Central Henan Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(5): 1 753-1 760.
- [29] 刘兴宇, 李广, 袁建钰, 等. 不同耕作措施下温度升高对旱作春小麦农田土壤 N₂O 排放的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(4): 177-184.
- LIU Xingyu, LI Guang, YUAN Jianyu, et al. Effects of temperature rise under different tillage measures on N₂O emission in dryland spring wheat farmland soil[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(4): 177-184.
- [30] 李思思, 张志强, 朱文华, 等. 不同灌溉量对马铃薯产量和土壤 N₂O 排放的影响[J]. *衡水学院学报*, 2019, 21(4): 20-25.
- LI Sisi, ZHANG Zhiqiang, ZHU Wenhua, et al. Effects of different irrigation levels on potato yield and soil N₂O emission[J]. *Journal of Hengshui University*, 2019, 21(4): 20-25.
- [31] SHU X X, WANG Y Q, WANG Y L, et al. Response of soil N₂O emission and nitrogen utilization to organic matter in the wheat and maize rotation system[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 4 396.
- [32] SAMAD M S, BAKKEN L R, NADEEM S, et al. High-resolution denitrification kinetics in pasture soils link N₂O emissions to pH, and denitrification to C mineralization[J]. *PLoS One*, 2016, 11(3): e0 151 713.
- [33] 陈吉吉, 王乙然, 曹文超, 等. 碳源和氧对设施菜田土壤 N₂O 排放的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(1): 114-123.
- CHEN Jiji, WANG Yiran, CAO Wenchao, et al. Effects of oxygen levels and carbon inputs on N₂O emission in greenhouse vegetable soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1): 114-123.
- [34] JAMALI H, QUAYLE W, SCHEER C, et al. Effect of soil texture and wheat plants on N₂O fluxes: A lysimeter study[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 223: 17-29.
- [35] 彭毅, 李惠通, 张少维, 等. 秸秆还田、地膜覆盖及施氮对冬小麦田 N₂O 和 N₂ 排放的影响[J]. *环境科学*, 2022, 43(3): 1 668-1 677.
- PENG Yi, LI Huitong, ZHANG Shaowei, et al. Effect of film mulching, straw retention, and nitrogen fertilization on the N₂O and N₂ emission in a winter wheat field[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(3): 1 668-1 677.
- [36] 覃潇敏, 郑毅, 汤利, 等. 施氮对间作条件下玉米、马铃薯根际微生物群落功能多样性的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2015, 32(4): 354-362.
- QIN Xiaomin, ZHENG Yi, TANG Li, et al. Effects of nitrogen application rates on rhizosphere microbial community functional diversity in maize and potato intercropping[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(4): 354-362.
- [37] CHEN Y L, YAO Z M, SUN Y, et al. Current studies of the effects of drought stress on root exudates and rhizosphere microbiomes of crop plant species[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(4): 2 374.
- [38] HU H Y, LI H, HAO M M, et al. Nitrogen fixation and crop productivity enhancements co-driven by intercrop root exudates and key rhizosphere bacteria[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2021, 58(10): 2 243-2 255.
- [39] WEN Z H, LI H B, SHEN Q, et al. Tradeoffs among root morphology, exudation and mycorrhizal symbioses for phosphorus-acquisition strategies of 16 crop species[J]. *New Phytologist*, 2019, 223(2): 882-895.
- [40] LAVILLE P, LEHUGER S, LOUBET B, et al. Effect of management, climate and soil conditions on N₂O and NO emissions from an arable crop rotation using high temporal resolution measurements[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(2): 228-240.

Regulating nitrogen fertilization to reduce N₂O emission in wheat-maize rotation farmlands in North China

BAI Fangfang¹, LI Ping^{1,2,3}, LU Hongfei⁴, LI Baiyu⁵, QI Xuebin^{1*}, MAO Wenwen^{6*}

(1. Institute of Farmland Irrigation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China; 2. Water Environment Factor Risk Assessment Laboratory of Agricultural Products Quality and Safety, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Xinxiang 453002, China; 3. Agricultural Water Soil Environmental Field Research Station of Xinxiang, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China; 4. Jiangsu Vocational College of Agriculture and Forestry, Jurong 212400, China; 5. Qingdao Institute of Technology, Qingdao 266300, China; 6. The Prevention and Control Center for the Geological Disaster of Henan Geological Bureau, Zhengzhou 450012, China)

Abstract: 【Objective】 N₂O is a greenhouse gas 298 times more effective than CO₂ at trapping heat in the atmosphere. Reducing its emission from agricultural soils hence plays a crucial role in mitigating global warming. In this paper, we investigate experimentally the efficacy of regulating nitrogen fertilization to reduce N₂O emission from wheat-maize rotation farmlands in Northern China.【Method】The experiment was conducted in field, consisting of conventional nitrogen fertilization of 300 kg/hm² (N1), and reduced nitrogen fertilization of 240 kg/hm² (N2). Without nitrogen fertilization was taken as the control (CK). In each treatment, we measured N₂O efflux during the growing season of the wheat and maize, respectively, as well as soil properties. 【Result】 ① Reducing nitrogen fertilization effectively reduced N₂O efflux; N₂O efflux in the maize growing season was much higher than that in the winter wheat growing season. Because of temperature difference, N₂O efflux induced by nitrogen fertilization to maize was higher than that to the wheat. ② The N₂O efflux was influenced by soil nitrogen and soil properties; its variation with these factors can be fitted to $N_2O \text{ efflux} = 181.952 + 1.450 \times NO_3^- - N + 8.401 \times NH_4^+ - N - 0.514 \times EC$ for the wheat, and $N_2O \text{ efflux} = -354.606 + 4.592 \times NO_3^- - N + 157.848 \times NH_4^+ - N$ to the maize, where EC is electrical conductivity of soil solution. 【Conclusion】 Appropriately reducing nitrogen fertilization can reduce N₂O efflux in winter wheat-maize rotation production systems without compromising the crop yields in Northern China, with the reduction in the maize growing season more significant than in the wheat growing season.

Key words: wheat and maize rotation; nitrogen reduction; N₂O emission flux; soil properties; stepwise regression analysis
责任编辑: 赵宇龙