



帅斯樑¹ 武煜秋¹ 商东耀² 刘森¹ 曹琰梅¹ 柯浩楠¹ 胡正华¹ 李琪¹

CO₂ 浓度缓增和氮肥减施对冬小麦田 N₂O 排放的影响

摘要

为探明麦田氧化亚氮(N₂O)排放对二氧化碳(CO₂)浓度缓增与氮肥减施的响应,选用扬麦22为试验材料,基于开顶式气室(OTC)构成的CO₂浓度自动控制平台开展田间试验.在环境大气CO₂浓度(AC,对照)的基础上设置CO₂浓度缓增处理(EC,自2016—2017年冬小麦生长季起在AC基础上逐年增加40 μmol·mol⁻¹,至2018—2019年生长季CO₂浓度比AC高120 μmol·mol⁻¹);在常规施氮量(N₁, 25 g·m⁻²)基础上设置氮肥减施处理(N₂, 15 g·m⁻²).使用静态暗箱-气相色谱法进行冬小麦田N₂O的气样采集与通量测定.结果表明:冬小麦生育期内,不同CO₂浓度与氮肥水平下冬小麦田N₂O通量生长季变化较为一致,整体均呈现波动下降特征;AC处理下,与N₁处理相比,N₂处理使得N₂O累积排放量显著降低45.2%($P=0.004$),EC处理下,不同氮肥水平对冬小麦田N₂O排放无显著影响;在冬小麦孕穗至乳熟期时,氮肥减施处理对麦田N₂O排放的影响较为明显;CO₂浓度缓增与氮肥减施共同作用时,施氮量是影响麦田N₂O排放量的主要因素.

关键词

冬小麦;CO₂浓度;氮肥;N₂O排放

中图分类号 S181;S512.11

文献标志码 A

收稿日期 2023-07-22

资助项目 国家自然科学基金(42071023,41775152)

作者简介

帅斯樑,男,硕士生,研究方向为地气碳氮交换.2257959024@qq.com

胡正华(通信作者),男,博士,教授,研究方向为温室气体排放和气象灾害风险评估等.zhhu@nuist.edu.cn

李琪(通信作者),男,博士,副教授,研究方向为气候变化生态.liqix123@sina.com

0 引言

近几十年大气中二氧化碳(CO₂)浓度持续增加,预计全球大气CO₂浓度在21世纪末期将增加到800 μmol·mol⁻¹以上^[1].受CO₂等温室气体排放影响,全球气温持续升高,而气候变暖会对人类社会可持续发展和自然生态系统稳定产生重要影响.同为重要温室气体的氧化亚氮(N₂O),其在大气环境中寿命较长,在百年时间尺度上对气候变暖的贡献率是CO₂的298倍^[2].研究表明,20世纪以来N₂O浓度的增加趋势很大程度是由于全球农业的扩张和集约化所驱动的,农业活动中N₂O排放量占全球的60%^[3].我国是农业大国,农业生产值占国内生产总值的12.5%^[4].小麦是我国最重要的禾谷类作物之一,麦田生态系统作为农业活动的重要组成部分,对全球N₂O排放有着显著贡献.因此,如何在保证小麦产量的情况下控制温室气体排放对我国应对气候变暖具有重要意义.

近年来,学者们针对大气CO₂浓度增加条件下的农田生态系统N₂O排放开展了许多研究与讨论.Yao等^[5]基于FACE(Free-Air CO₂ Enrichment)平台发现在氮肥充足条件下大气CO₂浓度增加会显著抑制稻田N₂O排放,并发现这种抑制可能与CO₂浓度增加促进作物生长的同时会向下传输O₂,促进了土壤对氮素的吸收有关.而王从等^[6]通过FACE平台的试验发现大气CO₂增加能提高土壤的硝化与反硝化效率,进而显著增加小麦季N₂O排放.也有研究表明,CO₂浓度升高对农田生态系统N₂O排放影响较小^[7].另外,作为植物生长过程中不可替代的一种营养元素,氮的使用对作物产量和农田温室气体排放的影响也十分重要.据统计,氮肥使全球粮食产量提升了约45%^[8],同时氮肥施用会提高土壤肥力,并且还会诱导硝化作用与反硝化作用^[9-10],进而导致N₂O排放增加^[11-13].研究表明,施氮量的增加会改变作物根系结构使作物从土壤中吸收更多的氨态氮与硝态氮,而土壤氨态氮与硝态氮含量减少直接影响N₂O产生的微生物过程^[14].Wang等^[15]和Han等^[16]的试验结果同样表明氮肥减施处理可以有效降低农田温室气体的排放.氮肥施用过多对环境造成的损失也是多方面的,如土壤酸化、地下水污染和温室气体排放^[17-18].在小麦生产过程中减少氮肥投入对缓解环境问题至关重要.然而在麦田生态系统中,通过减少氮肥投入来提高氮肥利用率是一个具有挑战性的问题,会导

1 南京信息工程大学 应用气象学院,南京,210044

2 河南省气象科学研究所/中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点实验室,郑州,450003

致小麦产量的降低^[19]. 氮肥作物作为农田最直接的氮素输入源, 在提高氮肥利用率和降低环境风险的同时获得目标小麦产量和效益至关重要.

综上, 目前关于农田 N₂O 排放的研究大多基于单因素(CO₂浓度、氮肥水平等)条件, 对两者之间的交互作用讨论较少, 且关于 CO₂浓度增加对 N₂O 排放影响的结论并不一致. 同时, 实际大气 CO₂浓度是缓慢增加的, 而非短期内突然增加到某一浓度后保持不变. 因此, 本研究基于开顶式气室(Open-Top Chambers, OTC)组成的 CO₂浓度自动控制平台开展原位观测试验, 分析 CO₂浓度缓增与氮肥减施及其交互处理对冬小麦 N₂O 排放的影响, 为气候变暖背景下农田氮肥管理与温室气体减排提供一定的参考依据.

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于 2016—2019 年小麦生长季在南京信息工程大学农业气象生态试验站内开展(32. 21°N, 118. 71°E; 海拔高度为 18. 0 m), 试验田土壤质地为壤质黏土, 处于亚热带季风气候区. 该试验地全年日照数 1 900 h 以上, 平均温度约 15. 6 °C, 平均年降水量约 1 100 mm, 相对湿度 76. 0%.

1.2 试验设计

试验依托 2016 年建成并运行的 CO₂浓度自动控制平台, 该控制平台包括开顶式气室(OTC)、温湿度自动检测记录仪、CO₂浓度传感器以及一套 CO₂浓度控制系统. 大致工作流程为: OTC 内 CO₂浓度传感器每 2 s 监测实时 CO₂浓度并反馈给控制系统, 如果低于预设浓度, 控制系统打开阀门向气室内补充 CO₂气体, 达到预设浓度则会关闭阀门停供 CO₂气体. 详细情况可参考文献[20].

试验将 CO₂浓度缓增作为主处理, 设置 2 个 CO₂浓度处理: 环境大气 CO₂浓度(AC, 对照)和 CO₂缓增处理(EC, CO₂浓度自 2016—2017 年冬小麦生长季起在 AC 基础上逐年增加 40 μmol·mol⁻¹, 至 2018—2019 年生长季 CO₂浓度比 AC 高 120 μmol·mol⁻¹). 副处理为氮肥减施, 设置 2 个氮肥处理: 常规施氮量(N₁, 25 g·m⁻²)和氮肥减施处理(N₂, 15 g·m⁻²). 组合处理为: ACN₁、ECN₁、ACN₂、ECN₂, 每种处理 4 次重复. CO₂浓度缓增处理从冬小麦返青期持续到成熟期.

本试验选用当地广泛种植的小麦品种扬麦 22

为试验材料, 表 1 为其主要生育期和肥料管理. 基肥选用复合肥(N 质量分数 15. 0%), 返青肥和拔节孕穗肥选用尿素(N 质量分数 46. 7%), 分基肥、返青肥、拔节-孕穗肥 3 次施用(施用比为 50. 0% : 35. 0% : 15. 0%). N₁和 N₂的基肥、返青肥、拔节-孕穗肥施用量分别为 83. 3、18. 7、8. 0 g·m⁻²和 50. 0、11. 2、4. 8 g·m⁻².

表 1 2018—2019 年冬小麦生长季主要生育期和氮肥管理
Table 1 Growth periods and nitrogen fertilizer management during winter wheat growing season of 2018—2019

日期	主要生育期与肥料管理	日期	主要生育期与肥料管理
2018-11-01	播种, 施基肥	2019-04-04	抽穗
2018-11-08	出苗	2019-04-08	扬花
2019-01-24	返青, 施返青肥	2019-04-22	灌浆
2019-03-14	拔节	2019-05-07	乳熟
2019-03-27	施拔节-孕穗肥	2019-05-17	成熟
2019-03-28	孕穗		

1.3 测定项目及方法

1.3.1 气样采集与 N₂O 通量测定

测定 2018—2019 年冬小麦生长季的 N₂O 通量. 由于 CO₂浓度缓增处理从越冬后冬小麦生长活跃的返青期开始, 所以气体采样也从返青期开始, 持续到成熟期. 提前在预设采样区域安装底座, 插入深度为 10 cm 的土壤中, 采样底座为泥塑材料的圆形盆钵(高 10 cm, 内径 20 cm), 上沿有内陷的凹槽(深约 2 cm). 采用静态暗箱-气相色谱法测定 N₂O 通量, 静态暗箱为聚氯乙烯材料(PVC)的圆筒(高 1 m, 内径 22 cm), 顶端留有 2 个圆孔用于安装放置温度计与抽气管道. 圆筒四周(除底部外)均用隔热铝箔和不透光胶带覆盖, 避免内部温度波动, 采样时在凹槽中注入适量水以保证采样系统密封.

气体采样时间选在 08:00—11:30, 此时土壤温度接近日均值. 在采样箱密封的第 0、10、20 min 时各抽取箱内气体一次, 同时对箱体内部温度进行记录, 每个气室连续采集 3 个气体样本. 使用 Agilent-7890B 型号气相色谱仪测定采集的气体样本, 采用线性法^[21]将每组气样中的 N₂O 混合比与间隔时间(0、10、20 min)线性回归得到 N₂O 的排放速率.

N₂O 累积排放量计算公式如下:

$$E = 24 \sum_{i=2}^n \frac{(F_i + F_{i-1})}{2} (D_i - D_{i-1}). \quad (1)$$

式中: E 为小麦季 N₂O 的累积排放量(mg·m⁻²); 常数 24 为时间换算系数(天数转换为小时); t 为采样

次数; n 为小麦季内总采样次数; F_t 、 F_{t-1} 分别为第 t 、 $t-1$ 次采样时 N₂O 排放量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); $D_t - D_{t-1}$ 为相邻两次采样之间的间隔天数 (d).

1.3.2 环境因子的测定

采集气样时,使用土壤水分温度测量仪 (Hydra Probe II, Stevens Water Monitoring Systems, USA) 记录土壤含水量与温度.

1.4 数据统计

数据预处理使用 Microsoft Excel 软件;方差分析使用 SPSS 27.0 (SPSS Inc., Chicago, USA) 软件对不同处理进行显著性分析 (LSD);制图使用 Origin 2022 (OriginLab Corp., Wellesley Hills, USA) 软件.

2 结果与分析

2.1 土壤含水量与温度的动态变化

冬小麦生长季试验点 5 cm 深土壤含水量与温度的变化特征如图 1 所示.土壤含水量表现出明显的季节性变化,最大出现在 2 月 25 日,达到 38.0%;而最小值则在 5 月 13 日,仅为 12.9%.整体上,土壤含水量呈现逐渐减少的趋势.此外,由于受降水影响,3 月底土壤含水量急剧增加.同时在生长季内,土壤温度也总体呈现上升趋势,从 2 月 25 日最低温度 (7.3 °C) 到 5 月 13 日最高温度 (26.8 °C),土壤温度经历了明显的波动增加,这表明季节的变化对土壤温度有着重要影响.

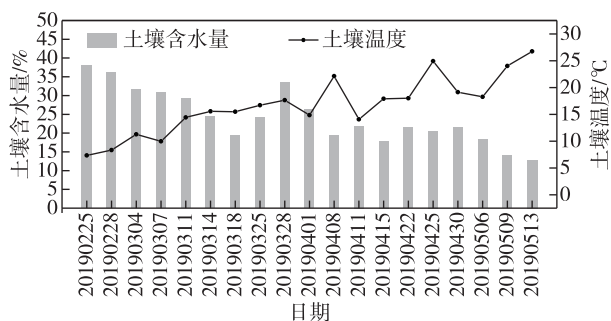


图 1 冬小麦生长季试验点土壤含水量与土壤温度的动态变化

Fig. 1 Dynamic changes in soil water content and soil temperature at test site during winter wheat growing season

2.2 CO₂缓增对麦田 N₂O 排放的影响

2.2.1 N₂O 通量生长季变化

小麦生长季内麦田 N₂O 通量在不同处理下变化趋势较为一致,呈现波动下降趋势,其中,孕穗期 4 种组合处理下均出现 N₂O 排放峰 (图 2).N₁ 处理下,AC

存在 2 个 N₂O 排放峰,分别出现在孕穗期 ($402.4 \pm 66.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 与灌浆期 ($122.7 \pm 16.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$),EC 同样在孕穗期 ($653.4 \pm 31.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 与灌浆期 ($107.1 \pm 56.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 存在排放峰.在整个小麦生育期内,AC 的 N₂O 通量一般高于 EC,生长前期差异较为明显,生长中后期差异较小.N₂ 处理下,AC 仅孕穗期有较为明显的峰值 ($266.9 \pm 148.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$),EC 处理在返青期 ($86.5 \pm 63.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 与孕穗期 ($314.1 \pm 137.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 分别存在峰值.小麦生长前期 EC 的 N₂O 通量始终高于 AC,生长中后期 AC、EC 的 N₂O 通量在一定范围内波动,总体相差不大.

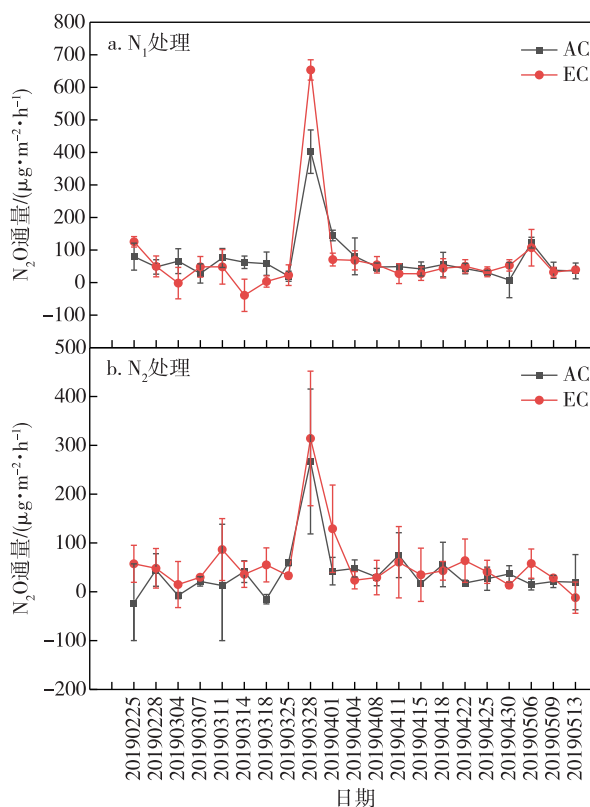
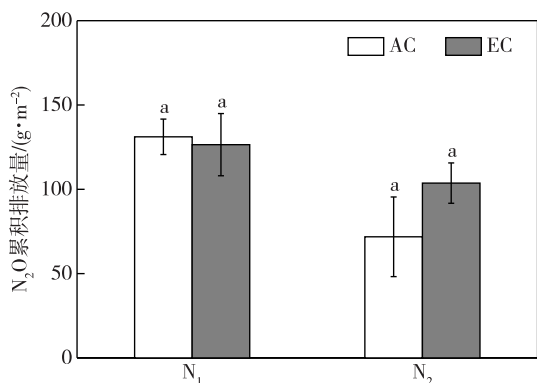


图 2 氮肥减施下 CO₂缓增对 N₂O 通量的影响

Fig. 2 Effect of gradually elevated CO₂ concentration on N₂O flux under reduced nitrogen fertilizer application

2.2.2 N₂O 累积排放量

由图 3 可知:N₁ 处理下,AC 和 EC 全生育期累积排放量分别为 131.1 ± 10.5 和 $126.5 \pm 18.5 \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$; N₂ 处理下,AC 和 EC 的全生育期累积排放量分别为 71.8 ± 23.6 和 $103.7 \pm 2.0 \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$.其中,与 AC 处理相比,EC 处理使得 N₁ 和 N₂ 处理下的 N₂O 累积排放量分别降低了 3.5% ($P=0.677$) 和 44.4% ($P=0.053$).



注: 2个CO₂浓度处理间统计差异显著性用不同字母表示, $P < 0.05$.

图3 氮肥减施下CO₂缓增对N₂O累积排放量的影响
Fig. 3 Impact of gradually elevated CO₂ concentration on cumulative N₂O emission under reduced nitrogen fertilizer application

2.3 不同施氮量对麦田N₂O通量的影响

2.3.1 N₂O通量生长季变化

图4为同一CO₂浓度不同氮肥处理下麦田N₂O通量生长季变化. 4种组合处理下的麦田N₂O通量变化特征一致, 基本在0~100 μg·m⁻²·h⁻¹区间波动, 孕穗期出现显著峰值. AC处理下, 小麦出苗至抽穗期N₁的通量均明显高于N₂, 扬花期至成熟期2个处理下N₂O通量相差不大, 但在灌浆期N₁的通量出现峰值(122.70±16.49 μg·m⁻²·h⁻¹). EC处理下, 大部分时期N₁、N₂的通量差异较小.

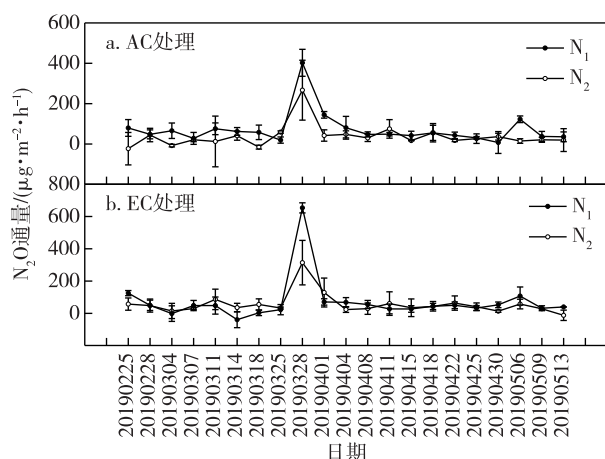
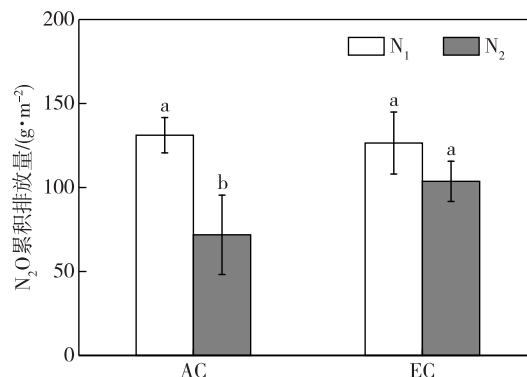


图4 CO₂缓增下氮肥减施对N₂O通量的影响

Fig. 4 Effect of nitrogen fertilizer reduction on N₂O flux under gradually elevated CO₂ concentration

2.3.2 N₂O累积排放量

同一CO₂浓度不同氮肥处理下麦田N₂O累积排放变化如图5所示. 不同CO₂处理下, 氮肥减施均在一定程度上降低了N₂O排放. 其中, 在AC和EC处理下, 与N₁处理相比, N₂处理分别使得N₂O累积排放量降低了45.2% ($P = 0.004$)和18.0% ($P = 0.083$).



注: 2个施氮量处理间统计差异显著性用不同字母表示, $P < 0.05$.

图5 CO₂缓增下氮肥减施对N₂O全生育期累积排放量的影响

Fig. 5 Impact of nitrogen fertilizer reduction on cumulative N₂O emission under gradually elevated CO₂ concentration

2.4 CO₂浓度缓增和氮肥减施对冬小麦田N₂O累积排放量的影响

如表2所示, 不同处理对冬小麦田N₂O累积排放量的影响因生育期而异. 在拔节期, 与ACN₁相比, ACN₂处理的N₂O累积排放量降低了39.3% ($P = 0.047$), 与ECN₂相比, 降低了31.0% ($P = 0.038$). 在孕穗期, 与ACN₁相比, ACN₂处理的N₂O累积排放量降低了47.4% ($P = 0.022$). 在灌浆期, 与ECN₁相比, ECN₂处理的N₂O累积排放量降低了38.1% ($P = 0.050$). 在乳熟期, 与ACN₁相比, ACN₂处理的N₂O累积排放量降低了65.6% ($P = 0.036$); 与ECN₁相比, ECN₂降低了53.6% ($P = 0.022$). 由表2可知, 氮肥减施对N₂O累积排放量影响程度高于CO₂浓度缓增对其影响, 并且双因素之间的交互作用并不明显.

2.5 N₂O通量与土壤温度、土壤含水量的关系

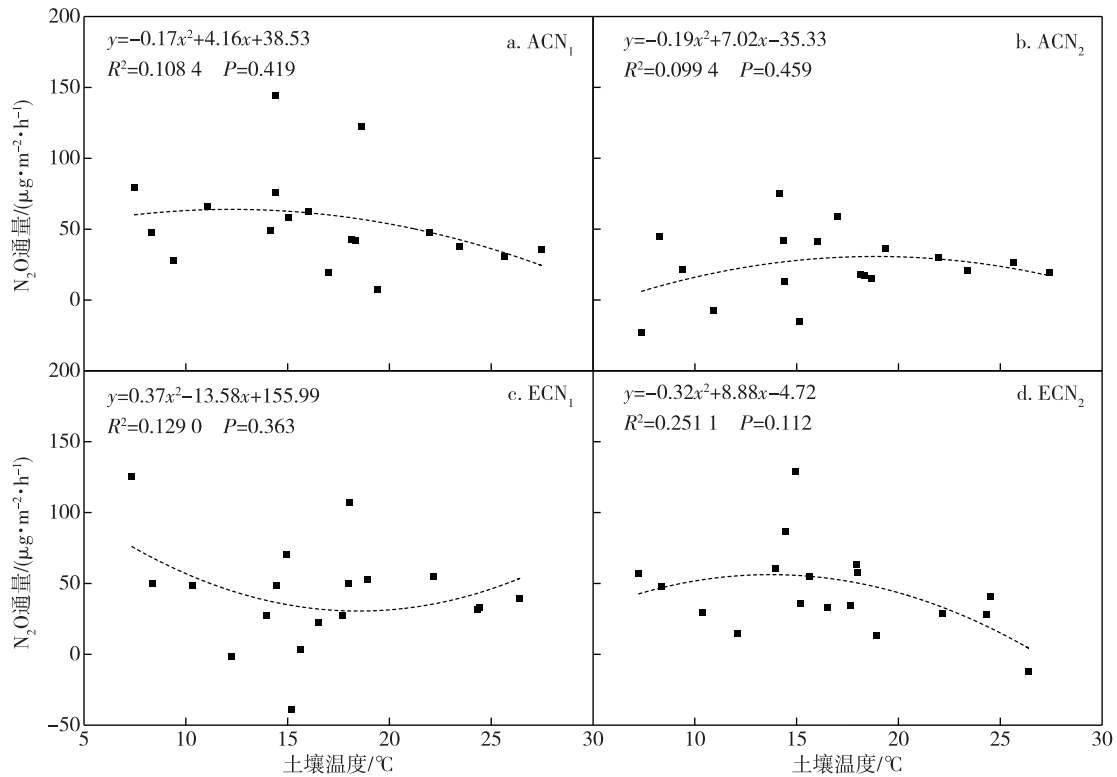
2.5.1 N₂O通量与土壤温度的关系

如图6所示, 麦田N₂O通量高值主要出现在土壤温度10~20℃的区间. 然而, 在4种组合处理下N₂O通量与土壤温度之间的关系并未达到显著水平.

表 2 CO₂缓增和氮肥减施对小麦生育期 N₂O 累积排放量的影响Table 2 Effect of gradually elevated CO₂ concentration and reduction of nitrogen fertilizer application on cumulative N₂O emission in wheat growth periods

		生育期						
		返青期	拔节期	孕穗期	抽穗期	扬花期	灌浆期	乳熟期
AC	N ₁	23.4±5.4aA	27.5±6.8aA	34.4±5.0aA	6.2±2.6aA	16.1±4.2aA	14.3±7.6aA	9.3±2.9aA
	N ₂	6.6±13.1aA	16.7±5.4bB	18.1±9.4aB	3.7±1.1aA	14.4±7.7aA	9.1±3.8aA	3.2±3.5aB
EC	N ₁	15.3±7.1aA	24.8±7.6aA	39.8±1.9aA	5.9±2.2aA	12.6±4.7aA	19.7±4.4aA	8.4±1.6aA
	N ₂	18.34±7.4aA	24.2±1.8aA	26.8±13.1aA	2.5±1.8aA	15.7±3.7aA	12.2±4.3aB	3.9±2.5aB
方差分析	CO ₂	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	N	ns	ns	**	**	ns	*	**
	CO ₂ +N	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注:数据形式为平均值±标准误(n=4);同一个生育期相同施氮量下2个CO₂浓度处理间统计差异达到显著用不同小写字母表示,同一个生育期相同CO₂浓度处理下2个施氮量处理间统计差异达到显著用不同大写字母表示,P<0.05;方差效应不显著用ns表示,0.01和0.05水平上方差效应显著分别用**、*表示。

图 6 CO₂缓增与氮肥减施下土壤温度与 N₂O 通量的关系Fig. 6 Relationship between soil temperature and N₂O flux under gradually elevated CO₂ concentration and reduction of nitrogen fertilizer application

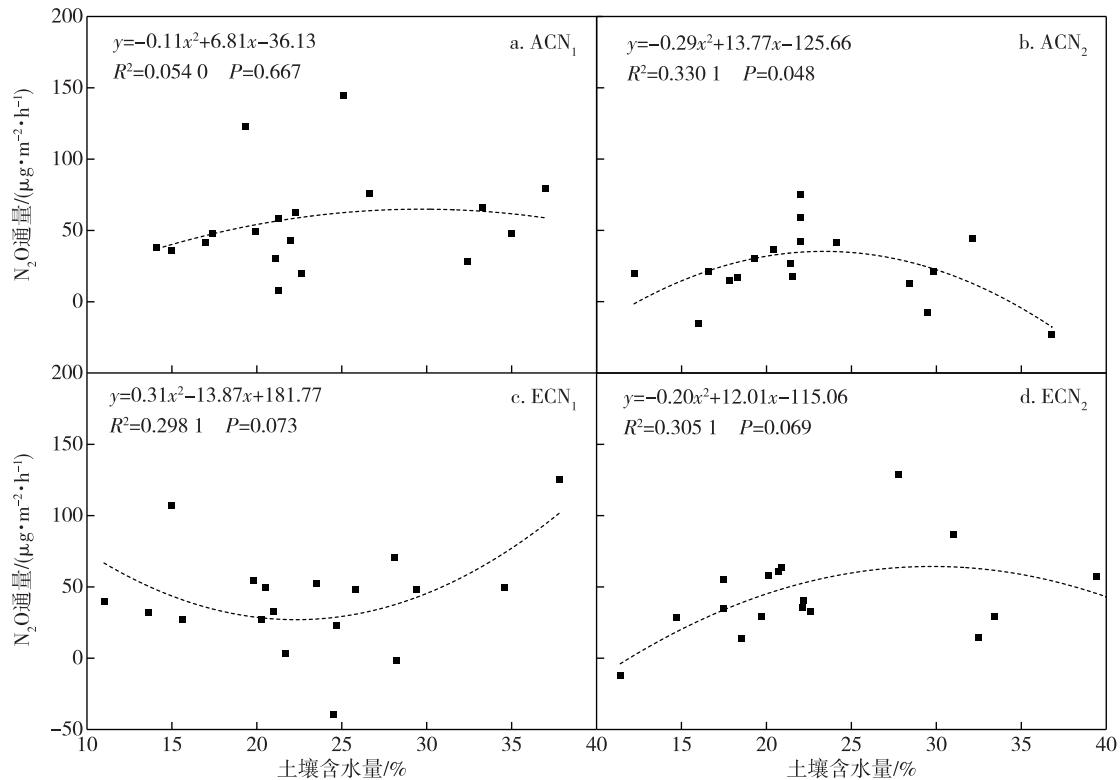
2.5.2 N₂O 通量与土壤含水量的关系

通过比较 CO₂缓增与氮肥减施下土壤含水量与 N₂O 通量关系(图 7),在土壤含水量为 20%~30% 的范围内,N₂O 通量较高.特别是 ACN₂处理下,N₂O 通量与土壤含水量之间的关系达到显著水平(P=0.048).

3 讨论

3.1 CO₂缓增对冬小麦田 N₂O 排放量的影响

本研究结果表明,CO₂浓度缓增并没有改变 N₂O 的季节变化规律,整体呈现波动下降趋势.由于前一天施用尿素且土壤含水量较大,肥料施于土壤表面

图7 CO₂缓增与氮肥减施下土壤含水量与N₂O通量关系Fig. 7 Relationship between soil water content and N₂O flux under gradually elevated CO₂ concentration and reduction of nitrogen fertilizer application

为反硝化细菌提供大量氮源,促进硝化作用,孕穗期AC和EC试验处理均出现麦田N₂O排放量急剧增加的情况^[22-23]。

在常规施氮量下,麦田N₂O通量多数时期都表现为AC>EC趋势,而N₂下通量则呈现EC>AC趋势。可以推测:N₁处理时,CO₂浓度缓增可以在一定程度上减少麦田N₂O通量;N₂处理时,CO₂浓度缓增可以一定程度地增加麦田N₂O通量。于海洋等^[24]曾用Meta分析方法发现CO₂浓度增加会降低反硝化酶活性从而降低N₂O通量,这与本研究中N₁处理的结果一致。N₂处理下,CO₂浓度缓增反而使更多的碳进入土壤之中,为反硝化细菌提供了足够的碳源和能量,进而促进了反硝化细菌的活性,导致麦田N₂O通量增加^[25]。另一种说法认为:有机碳能加强微生物生命活动,土壤氧气含量降低导致硝化作用减弱、反硝化作用增强;氮肥较少时,一定量的CO₂增加反而抑制了微生物生命活动,从而促进了N₂O排放。即常规氮肥水平CO₂浓度适量提升能够提高土壤氮素利用率,减少N₂O产物,从而减少麦田N₂O通量^[26],低氮条件下麦田N₂O通量会随CO₂缓增而增加。也有

研究表明,决定反硝化强弱的是土壤中的有效碳含量而非总碳量^[27],可能过高的CO₂浓度反而会使土壤有效碳含量降低,所以低氮条件下CO₂的增加使N₂O通量增加,具体原因还需要有针对性地开展更细致的研究来探明其中的关系与影响机制。

3.2 氮肥减施对麦田N₂O排放量的影响

氮是小麦生长发育必不可少的元素,施氮量与麦田N₂O排放密切相关。在本研究中,同一CO₂浓度处理下麦田N₂O通量数据显示不同施氮量下N₂O排放规律较为一致。在相同CO₂处理下,N₂处理一定程度地降低了麦田N₂O通量与累积排放量。氮肥减施处理下由于小麦自身生长消耗会降低土壤中的硝化与反硝化作用,使得麦田N₂O通量显著降低^[28]。有研究表明,最大施氮量处理下N₂O通量处于峰值,并且排放量也会随着施氮量增加呈指数增长趋势^[29]。马兴华等^[30]指出,增加施氮量会增加土壤中氨态氮的浓度,周慧等^[31]也认为土壤中铵态氮浓度与麦田N₂O排放量存在极显著的正相关关系,这些结论都与本文试验结果一致。在农田生态系统中,N₂O的排放不仅与土壤氮含量有关,作物对氮肥的

吸收率也会影响其排放.当施氮量恰好满足作物所需量,土壤中大部分的氮肥都会被作物吸收,而如果施氮量过多,多余的氮肥将会作为 N₂O 的底物,进而排放量增加.从冬小麦整个生育期来看,氮肥减施处理对降低麦田 N₂O 排放量是有效的.其中,小麦 N₂O 累积排放量在拔节、孕穗、灌浆和乳熟期受氮肥影响明显,原因是这些时期冬小麦对氮肥吸收率较大,对氮肥减施处理较其他生育期敏感.

3.3 CO₂ 浓度缓增和氮肥减施交互作用对麦田 N₂O 排放量的影响

本次试验结果显示,CO₂ 缓增处理对麦田 N₂O 排放影响未达到显著水平,氮肥减施处理对麦田 N₂O 排放影响在返青期、拔节期与扬花期达到显著水平,两种处理对 N₂O 排放影响的交互作用在返青期达到显著水平.研究还表明,两种处理对麦田 N₂O 排放影响中施氮量为主要影响因素.党慧慧等^[32] 通过试验发现,在 CO₂ 增加与氮肥减施共同处理下,氮肥因素对小麦的生长过程影响更大,并且推测氮肥水平是通过影响作物光合作用过程进而影响其生长发育.在本次冬小麦生长季期间,氮肥减施处理有效地减少了麦田 N₂O 排放,生长季中期小麦生长迅速并对外界环境变化较为敏感,氮肥影响明显.CO₂ 缓增与氮肥减施的交互作用在影响 N₂O 排放量方面和单一 CO₂ 缓增效果类似,均未达到显著水平,可能 CO₂ 缓增会降低氮肥对 N₂O 排放量的促进作用. Bloom 等^[33] 研究发现增加环境 CO₂ 浓度会改变作物对氮素吸收的形态偏好,即 CO₂ 浓度增加会导致 C3 作物对硝态氮的吸收能力下降,这可能是导致 CO₂ 缓增反而氮肥作用效果降低的原因.也有相关研究推测是复杂氮化合物合成不足或其他多因素影响(病虫害、高温)导致的^[32,34].因此,在 CO₂ 缓增和氮肥减施的双因素作用下麦田 N₂O 的变化没达到显著水平.另外,CO₂ 缓增对 N₂O 的作用也可能受试验品种对氮肥敏感度影响^[35],李俊志等^[36] 研究表明氮肥水平对不同小麦品种的产量与品质作用效果有所差异,所以需要设置更加细致的氮肥梯度来验证缓增条件下排放变化.

4 结论

冬小麦生育期内,不同 CO₂ 浓度与氮肥处理下冬小麦田 N₂O 通量变化趋势较为一致,整体均呈现波动下降特征.CO₂ 缓增处理在冬小麦生长季中对麦田

N₂O 排放的影响均不显著.氮肥减施处理能够有效减少麦田 N₂O 排放,大气 CO₂ 浓度下氮肥减施降低了 45.2%($P=0.004$)的 N₂O 累积排放量.在冬小麦孕穗至乳熟期时,氮肥减施处理对麦田 N₂O 排放的影响较为明显.本文亦表明 CO₂ 浓度缓增与氮肥减施共同作用时,施氮量是影响麦田 N₂O 排放量的主要因素.

参考文献

References

- [1] 姜克隽. IPCC AR6: 长期减排路径[J]. 气候变化研究进展, 2023, 19(2): 133-138
JIANG Kejun. AR6 WG III report: long-term mitigation pathways[J]. Climate Change Research, 2023, 19(2): 133-138
- [2] Menon S, Denman K L, Brasseur G, et al. Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry [R]. Lawrence Berkeley National Lab. (LBNL), Berkeley, CA, US. 2007: LBNL-464E
- [3] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体 (CO₂、CH₄、N₂O) 的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 966-975
ZHANG Yuming, HU Chunsheng, ZHANG Jiabao, et al. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO₂, CH₄ and N₂O in agricultural soils [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4): 966-975
- [4] 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
- [5] Yao Z S, Wang R, Zheng X H, et al. Elevated atmospheric CO₂ reduces yield-scaled N₂O fluxes from subtropical rice systems: six site-years field experiments [J]. Global Change Biology, 2021, 27(2): 327-339
- [6] 王从, 李舒清, 刘树伟, 等. 大气 CO₂ 浓度和温度升高对稻麦轮作生态系统 N₂O 排放的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(13): 2535-2550
WANG Cong, LI Shuqing, LIU Shuwei, et al. Response of N₂O emissions to elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature in rice-wheat rotation agroecosystem [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(13): 2535-2550
- [7] 徐仲均, 郑循华, 王跃思, 等. 开放式空气 CO₂ 增高对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(10): 1245-1248
XU Zhongjun, ZHENG Xunhua, WANG Yuesi, et al. Effects of elevated atmospheric CO₂ on CH₄ and N₂O emissions from paddy fields [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(10): 1245-1248
- [8] 朱兆良. 合理使用化肥 充分利用有机肥 发展环境友好的施肥体系[J]. 中国科学院院刊, 2003, 18(2): 89-93

- ZHU Zhaoliang. Fertilizer management strategies for the harmonization of agriculture development with environment protection[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2003, 18(2): 89-93
- [9] Qiu W H, Liu J S, Li B Y, et al. N_2O and CO_2 emissions from a dryland wheat cropping system with long-term N fertilization and their relationships with soil C, N, and bacterial community[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(8): 8673-8683
- [10] Liu Y N, Li Y C, Peng Z P, et al. Effects of different nitrogen fertilizer management practices on wheat yields and N_2O emissions from wheat fields in North China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(6): 1184-1191
- [11] Davidson E A, Keller M, Erickson H E, et al. Testing a conceptual model of soil emissions of nitrous and nitric oxides; using two functions based on soil nitrogen availability and soil water content, the hole-in-the-pipe model characterizes a large fraction of the observed variation of nitric oxide and nitrous oxide emissions from soils[J]. Biogeochemistry, 2000, 50(8): 667-680
- [12] Norton J, Ouyang Y. Controls and adaptive management of nitrification in agricultural soils[J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 1931
- [13] Scheer C, Fuchs K, Pelster D E, et al. Estimating global terrestrial denitrification from measured N_2O : (N_2O+N_2) product ratios[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2020, 47: 72-80
- [14] Plaza-Bonilla D, Álvaro-Fuentes J, Arrúe J L, et al. Tillage and nitrogen fertilization effects on nitrous oxide yield-scaled emissions in a rainfed Mediterranean area[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 189: 43-52
- [15] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH_4 , CO_2 and N_2O emissions from a short-plant ecosystem[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 20(5): 842-844
- [16] Han F, Guo R, Hussain S, et al. Rotation of planting strips and reduction in nitrogen fertilizer application can reduce nitrogen loss and optimize its balance in maize-peanut intercropping[J]. European Journal of Agronomy, 2023, 143: 126707
- [17] Vitousek P M, Naylor R, Crews T, et al. Nutrient imbalances in agricultural development[J]. Science, 2009, 324(5934): 1519-1520
- [18] Dawson C J, Hilton J. Fertiliser availability in a resource-limited world: production and recycling of nitrogen and phosphorus[J]. Food Policy, 2011, 36: S14-S22
- [19] Liu C R, Ren D Y, Liu H R, et al. Optimizing nitrogen management diminished reactive nitrogen loss and acquired optimal net ecosystem economic benefit in a wheat-maize rotation system[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 331: 129964
- [20] 刘超, 胡正华, 陈健, 等. 不同 CO_2 浓度升高水平对水稻光合特性的影响[J]. 生态环境学报, 2018, 27(2): 246-254
- LIU Chao, HU Zhenghua, CHEN Jian, et al. Effects of elevated CO_2 concentration levels on photosynthetic characteristics of rice[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(2): 246-254
- [21] 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 N_2O 排放的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(11): 3961-3968
- CHEN Jinsai, SUN Weihao, WANG Guangshuai, et al. Effects of different nitrogen application rates on soil water stable aggregates and N_2O emission in winter wheat field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(11): 3961-3968
- [22] Ye R W, Averill B A, Tiedje J M. Denitrification: production and consumption of nitric oxide[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1994, 60(4): 1053-1058
- [23] 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-Environmental Science, 2020, 39(2): 418-428
- [24] 于海洋, 王天宇, 黄琼, 等. CO_2 浓度升高对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响: Meta 分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(3): 517-527
- YU Haiyang, WANG Tianyu, HUANG Qiong, et al. Effects of elevated CO_2 concentration on CH_4 and N_2O emissions from paddy fields: a meta-analysis[J]. Science China Earth Sciences, 2022, 52(3): 517-527
- [25] Ineson P, Coward P A, Hartwig U A. Soil gas fluxes of N_2O , CH_4 and CO_2 beneath *Lolium perenne* under elevated CO_2 : the Swiss free air carbon dioxide enrichment experiment[J]. Plant and Soil, 1998, 198(1): 89-95
- [26] 封克, 王子波, 王小治, 等. 土壤 pH 对硝酸根还原过程中 N_2O 产生的影响[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 81-86
- FENG Ke, WANG Zibo, WANG Xiaozhi, et al. Effect of soil pH on N_2O production in nitrate reduction[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(1): 81-86
- [27] 梁东丽, 同延安, Ove Emteryd, 等. 壤土土壤剖面中 N_2O 浓度的时间和空间变异[J]. 生态学报, 2003, 23(4): 731-737
- LIANG Dongli, TONG Yanan, Ove Emteryd, et al. Spatial and temporal variation of nitrous oxide concentrations in soil profiles of Manural Loessial soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(4): 731-737
- [28] 曾科, 王书伟, 朱文彬, 等. 施氮方式与添加脲酶/硝化抑制剂对稻季 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(2): 220-231
- ZENG Ke, WANG Shuwei, ZHU Wenbin, et al. Effects of nitrogen application methods combined with urease/nitrification inhibitor on decreasing NH_3 volatilization and N_2O emission in rice season[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2023, 29(2): 220-231
- [29] Shcherbak I, Millar N, Robertson G P. Global metaanalysis of the nonlinear response of soil nitrous oxide (N_2O) emissions to fertilizer nitrogen[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(25): 9199-9204
- [30] 马兴华, 于振文, 梁晓芳, 等. 施氮量和底施追施比例对土壤硝态氮和铵态氮含量时空变化的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 4630-4634

- MA Xinghua, YU Zhenwen, LIANG Xiaofang, et al. Effects of nitrogen application rate and its basal-/top-dressing ratio on spatio-temporal variations of soil NO₃⁻-N and NH₄⁺-N contents [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(4): 4630-4634
- [31] 周慧, 史海滨, 郭珈玮, 等. 有机无机肥配施对不同程度盐渍土 N₂O 排放的影响 [J]. 环境科学, 2020, 41(8): 3811-3821
- ZHOU Hui, SHI Haibin, GUO Jiawei, et al. Effects of the combined application of organic and inorganic fertilizers on N₂O emissions from saline soil [J]. Environmental Science, 2020, 41(8): 3811-3821
- [32] 党慧慧, 刘超, 夏晔, 等. 不同 CO₂ 浓度和施氮水平对麦田 CO₂ 净通量的影响 [J]. 南京信息工程大学学报 (自然科学版), 2022, 14(1): 77-87
- DANG Huihui, LIU Chao, XIA Ye, et al. Effect of different elevated CO₂ concentrations and nitrogen application on net CO₂ fluxes in wheat field [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2022, 14(1): 77-87
- [33] Bloom A J, Asensio J S R, Randall L, et al. CO₂ enrichment inhibits shoot nitrate assimilation in C3 but not C4 plants and slows growth under nitrate in C3 plants [J]. Ecology, 2012, 93(2): 355-367
- [34] 李明, 李迎春, 韩雪, 等. 大气 CO₂ 浓度升高和氮肥互作对玉米花后功能叶碳氮同化物的影响 [J]. 中国农业气象, 2021, 42(9): 715-728
- LI Ming, LI Yingchun, HAN Xue, et al. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration and nitrogen application on mass fractions of carbon and nitrogen assimilates in functional leaves of maize after flowering [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2021, 42(9): 715-728
- [35] 孙宝宝, 刘晓雨, 袁睿, 等. 升温 and 大气 CO₂ 浓度升高对不同品种小麦养分吸收的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1389-1399
- SUN Baobao, LIU Xiaoyu, YUAN Rui, et al. Effects of warming and atmospheric CO₂ enrichment on nutrient uptake of different wheat varieties [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(6): 1389-1399
- [36] 李俊志, 常旭虹, 王德梅, 等. 施氮水平对不同强筋小麦品种产量和品质的影响 [J]. 作物杂志, 2023(3): 148-153
- LI Junzhi, CHANG Xuhong, WANG Demei, et al. Effects of nitrogen application levels on yield and quality of different strong gluten wheat varieties [J]. Crops, 2023(3): 148-153

Effects of gradually elevated CO₂ concentration and reduced nitrogen application on N₂O emission in winter wheat field

SHUAI Siliang¹ WU Manqiu¹ SHANG Dongyao² LIU Miao¹
CAO Yanmei¹ KE Haonan¹ HU Zhenghua¹ LI Qi¹

¹ School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

² Henan Institute of Meteorological Science/ Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, CMA, Zhengzhou 450003, China

Abstract To investigate the response of N₂O emission in wheat field to the gradually elevated CO₂ concentration and the reduction of nitrogen fertilizer application, we conducted field experiments using Yangmai 22 as the experimental material. The experiments were carried out on a field equipped with an automatic CO₂ concentration control platform formed by Open-Top Chambers (OTC). Under the condition of ambient atmospheric CO₂ concentration (AC), a treatment of gradually elevated CO₂ concentration (EC) was set up, which increased by 40 μmol·mol⁻¹ annually from the winter wheat growing season of 2016–2017, reaching 120 μmol·mol⁻¹ higher than AC in the wheat growing season of 2018–2019. The nitrogen fertilizer treatments were set as a conventional level (N₁, 25 g·m⁻²) and a reduced level (N₂, 15 g·m⁻²). The N₂O fluxes were measured by a static opaque chamber-gas chromatograph method. The results indicated that throughout the winter wheat growing period, the changes of N₂O emission from winter wheat field were relatively consistent for all treatments with an overall fluctuating downward trend. No significant effect of EC treatment on N₂O emission was observed during the winter wheat growing seasons. While the N₂ treatment significantly reduced the cumulative N₂O emission by 45.2% compared with the N₁ treatment ($P=0.004$) under the AC, which was not significant under EC treatment. The impact of nitrogen reduction on N₂O emission was evident during winter wheat stage from booting to milking. Under the combined effect of gradually elevated CO₂ concentration and reduced nitrogen fertilizer application, the latter was the main factor affecting N₂O emission in winter wheat field.

Key words winter wheat; CO₂ concentration; nitrogen fertilizer; N₂O emission