

曹琰梅,柯浩楠,商东耀,等. CO₂浓度缓增对冬小麦田N₂O排放的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(5): 855-864.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2024.05.010

CO₂ 浓度缓增对冬小麦田N₂O排放的影响

曹琰梅¹, 柯浩楠¹, 商东耀², 武煜秋¹, 帅斯樑¹, 胡正华¹, 李 琪¹

(1.南京信息工程大学生态与应用气象学院,江苏 南京 210044; 2.河南省气象科学研究所,中国气象局农业气象保障与应用技术重点实验室,河南 郑州 450003)

摘要: 为研究 CO₂ 浓度缓增对冬小麦田N₂O排放的影响,利用由开顶式气室(OTC)组成的 CO₂ 浓度自动调控平台,扬麦 22 号为供试材料开展田间试验。将大气 CO₂ 浓度作为对照(CK),设置 CO₂ 浓度缓增处理 C₈₀(CO₂ 浓度缓慢增加 80 μmol/mol)和 C₁₂₀(CO₂ 浓度缓慢增加 120 μmol/mol)。结果表明,CO₂ 浓度缓增处理没有改变小麦田N₂O排放通量的季节性变化特征。在2017–2018 年冬小麦生长季,CK、C₈₀ 处理土壤N₂O累积排放量分别为(25.49±3.33) mg/m²、(26.83±3.21) mg/m²;2018–2019 年冬小麦生长季,CK、C₁₂₀ 处理土壤N₂O累积排放量分别为(113.06±2.66) mg/m²、(121.20±9.28) mg/m²。在2017–2018 年冬小麦生长季,CK、C₈₀ 处理土壤-冬小麦系统N₂O累积排放量分别为(25.99±1.39) mg/m²、(29.83±4.20) mg/m²。各生育期土壤N₂O累积排放量与冬小麦地上部分生物量呈极显著正相关($P<0.01$),土壤-冬小麦系统N₂O累积排放量与冬小麦地上部分生物量呈极显著正相关($P<0.01$)。

关键词: 冬小麦; N₂O排放量; 开顶式气室; CO₂浓度缓增

中图分类号: S512.1⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2024)05-0855-10

Effects of gradually elevated CO₂ concentration on N₂O emission from winter wheat field

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

(1.School of Ecology and Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2.Henan Institute of Meteorological Science, Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, China Meteorological Administration, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: In order to study the effects of gradually elevated CO₂ concentration on N₂O emission from winter wheat field, a field experiment was carried out with Yangmai 22 as the test material by using an open-top chamber (OTC). Using atmospheric CO₂ concentration as the control (CK), and two gradually elevated CO₂ concentration treatments, C₈₀(CO₂ concentration increased by 80 μmol/mol) and C₁₂₀(CO₂ concentration increased by 120 μmol/mol), were set. The results showed that the seasonal variation of N₂O emission flux in wheat field was not changed by the slow increase of CO₂ concentration. During 2017–2018 winter wheat growing season, the cumulative N₂O emissions from soil in CK and C₈₀ treatment were (25.49±3.33) mg/m² and (26.83±3.21) mg/m², respectively. During 2018–2019 winter wheat growing season, the accumulative N₂O emissions in CK and C₁₂₀ treatment were (113.06±2.66) mg/m² and (121.20±9.28) mg/m², respectively. During 2017–2018

收稿日期:2023-05-08

基金项目:国家自然科学基金项目(42071023,41775152)

作者简介:曹琰梅(1999–),女,新疆巴州人,硕士研究生,研究方向为气候变化与地-气系统碳氮交换。(E-mail) 1473939077@qq.com

通讯作者:胡正华, (E-mail) zhhu@nuist.edu.cn; 李 琪, (E-mail) liqix123@sina.com

winter wheat growing season, the cumulative N₂O emissions from the soil-winter wheat system in CK and C₈₀ treatment were (25.99±1.39) mg/m² and (29.83±4.20) mg/m², respectively. The cumulative N₂O emission from soil was positively correlated with the aboveground biomass of winter wheat ($P<0.01$), and the cumulative N₂O emission from soil-winter wheat system was positively correlated with the

aboveground biomass of winter wheat ($P < 0.01$).

Key words: winter wheat; N_2O emissions; open top chamber; gradually elevated CO_2 concentration

CO_2 是主要的温室气体, CO_2 浓度随着人类活动的增加而逐年上升, 目前浓度为 $419 \mu\text{mol/mol}$, 预计 2050 年会增加到 $550 \mu\text{mol/mol}$ ^[1]。 CO_2 浓度升高已成为全世界共同面临的环境问题^[2]。 N_2O 作为三大温室气体之一, 其百年尺度上增温潜势是 CO_2 的 273 倍, 在 2012–2019 年, 大气中 N_2O 含量的增长速度达到了每年 0.96 nmol/mol ^[3]。 农田生态系统的 N_2O 排放量占人为温室气体排放量的 65%, 是主要的 N_2O 排放源^[2]。 小麦 2022 年种植总面积达到 $2.3 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ^[4], 是重要的粮食作物。 因此, 研究大气 CO_2 浓度升高对小麦田 N_2O 排放的影响, 有助于科学应对未来气候变化, 确保农业生产安全。

有关 CO_2 浓度升高对农田 N_2O 排放影响的研究, 不同学者采用不同的 CO_2 浓度升高模拟方式得到的结论也有所不同。 王从等^[5] 发现, CO_2 浓度缓增至 $500 \mu\text{mol/mol}$ 左右, 小麦生物量和产量显著提高, 同时稻麦轮作系统 N_2O 排放显著增加。 Welzmler 等^[6] 研究结果表明, CO_2 浓度骤增 $200 \mu\text{mol/mol}$ 使土壤-高粱系统的 N_2O 排放增多, 其原因是土壤反硝化细菌活性提高。 Sun 等^[7] 发现, 大气 CO_2 浓度骤增至 $700 \mu\text{mol/mol}$, 土壤矿质氮浓度降低, 溶解有机碳 (DOC) 浓度升高, 稻田土壤 N_2O 累积排放通量显著降低。 在葡萄牙的稻田中, Pereira 等^[8] 将 CO_2 浓度骤增至 $550 \mu\text{mol/mol}$, 发现土壤-水稻系统的 N_2O 总排放量无显著变化。 值得注意的是, 上述研究结论并不相同, 可能是由于 CO_2 浓度升高方式的不同, 缓增 CO_2 浓度和骤增 CO_2 浓度会对农田生态系统 N_2O 排放量产生不同影响。 这些研究虽然在一定程度上可以体现 CO_2 浓度升高对 N_2O 排放的影响, 但都忽略了大气 CO_2 浓度的增加实际上是一个连续缓增的过程。 CO_2 浓度连续缓增更接近未来大气变化的真实情况, 对于实际生产更有借鉴意义。

本研究采用开顶式气室 (OTC) 缓增 CO_2 浓度, 从试验第一年开始逐年增加 $40 \mu\text{mol/mol}$ 进行冬小麦试验, 利用静态暗箱-气相色谱法, 对不同 CO_2 浓度条件下冬小麦系统 N_2O 排放通量开展原位观测试验, 探究 CO_2 浓度缓增对冬小麦田 N_2O 排放的影响, 以期为评估未来农田 N_2O 排放及其变化趋势提供一定的参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验区域概况

本研究试验田位于南京信息工程大学 (118.71°E , 32.21°N), 属亚热带季风气候, 季节降水量差异大, 多年平均降水量为 1100 mm , 平均温度 15.6°C 。 耕作层土壤类型为潜育型水稻土和壤质黏土, 土壤 pH 值 6.3, 水土比为 5:2, 黏粒含量 26.1%, 有机碳含量 11.95 g/kg , 全氮含量 1.19 g/kg 。

1.2 田间试验设计

本试验采用的 CO_2 浓度自动控制平台是由 8 个开顶式气室、 CO_2 浓度传感器、控制系统和供气系统 4 个部分组成, 可以自动调控开顶式气室内 CO_2 浓度。 开顶式气室为正八边形棱柱体, 外围安装有高透光特性的玻璃, 外部框架材质为铝合金, 开顶式气室对边直径 3.75 m , 高 3 m , 底面积 10 m^2 , 顶部敞口并向内倾斜 45° 。 各开顶式气室中安装有 CO_2 浓度传感器、温湿度监测仪。 控制系统设置参照党慧慧等^[9] 的设置。

CO_2 浓度自动控制平台自 2016 年缓增 CO_2 浓度。 试验设置 3 个 CO_2 浓度处理, 分别为对照 (CK)、 CO_2 浓度增加 $80 \mu\text{mol/mol}$ 处理 (C_{80})、 CO_2 浓度增加 $120 \mu\text{mol/mol}$ 处理 (C_{120})。 对照 CO_2 浓度为 $410 \sim 420 \mu\text{mol/mol}$, 与大气中 CO_2 浓度一致。 C_{80} 处理即 2017–2018 年, 在小麦生长季自动调控开顶式气室内 CO_2 浓度增加 $80 \mu\text{mol/mol}$, 即 CO_2 浓度为 $490 \sim 500 \mu\text{mol/mol}$ 。 C_{120} 处理即 2018–2019 年, 在小麦生长季自动调控开顶式气室内 CO_2 浓度增加 $120 \mu\text{mol/mol}$, 即 CO_2 浓度为 $530 \sim 540 \mu\text{mol/mol}$ 。 每个处理均有 4 个重复。 供试冬小麦品种为扬麦 22 号, 主要生育期及肥料管理如表 1 所示。

表 1 冬小麦关键生育期和肥料管理

Table 1 Critical growth periods and fertilizer management of winter wheat

生长发育时期	肥料管理
播种期	施混合肥 (含 N 量 15%、 P_2O_5 量 15%、 K_2O 量 15%) 105 g/m^2
返青期	施尿素 (含 N 量 46.7%) 9.6 g/m^2
拔节孕穗期	施尿素 (含 N 量 46.7%) 4.8 g/m^2

1.3 测定项目及方法

1.3.1 N₂O气体采集与分析 静态暗箱(内径 22 cm,高 1 m)呈圆柱状,顶端封口且留有安装温度计和抽气管的小孔,为避免在采样过程中箱内温度变化对试验产生影响,在箱体外围包裹不透光胶带和隔热铝箔。采样底座是圆形无底盆钵(内径 20 cm,高 10 cm),底座上部有向内凹陷的凹槽(深 2 cm)。采样底座在冬小麦出苗后套在冬小麦植株上,用于土壤-冬小麦系统气体采样;采样底座安置于行间无植株裸土处,并在整个生长季去除底座内杂草。在 2017–2018 年冬小麦生长季进行土壤和土壤-冬小麦系统N₂O通量观测,在 2018–2019 年冬小麦生长季进行土壤N₂O通量观测。采样过程如下:首先在事先安装好的采样底座上放置采样箱,向槽内加水达到密封效果,并安装温度计和采气针筒,采气针筒为 50 ml 医用塑料注射器。在封箱后每隔 10 min 抽一次气体,共抽 3 次,并读取圆筒内始末温度。具体采样方法详见商东耀的方法^[10]。最后,计算N₂O的排放速率^[11];计算每组 3 个样品中N₂O气体混合比,并与其对应的间隔时间进行线性回归。

气体通量的计算:假定采样箱横截面积为 A ,采样箱有效高度,即地表至箱顶的高度为 H 。则箱内空气体积 $V=AH$ 。温室气体的排放通量 F 为:

$$F = \rho V \frac{dN}{dt} \cdot \frac{1}{A} = \frac{MP}{R(273+T)} \cdot \frac{V}{A} \cdot \frac{dN}{dt} \\ = H \frac{MP}{R(273+T)} \cdot \frac{dN}{dt} \quad (1)$$

式中, F 为N₂O排放通量 [$\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$], ρ 为N₂O气体密度 (g/L), M 为N₂O摩尔质量 (g/mol), dN/dt 为N₂O排放速率 [$\mu\text{L}/(\text{L} \cdot \text{min})$], R 为普适气体常数, $8.314 [\text{Pa} \cdot \text{m}^3/(\text{mol} \cdot \text{K})]$, T 为采样时箱内平均气温 ($^{\circ}\text{C}$)。 P 为采样点大气压力,本研究中 $P=1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。经整理可得到N₂O排放通量(F)的计算式为:

$$F = 60H \frac{44 \times 1.013}{8.314 \times (273+T)} \cdot \frac{dN}{dt} \quad (2)$$

式中,常数 60 为时间换算常数, $1 \text{ h}=60 \text{ min}$ 。 H 为采样箱的有效高度 (m), T 为采样时箱内平均气温 ($^{\circ}\text{C}$), dN/dt 为N₂O排放速率 [$\mu\text{L}/(\text{L} \cdot \text{min})$]。

冬小麦生长季N₂O累积排放通量计算公式如下:

$$E = 24 \sum_{i=2}^n (D_i - D_{i-1}) \frac{(F_{i-1} + F_i)}{2} \quad (3)$$

式中, E 为冬小麦生长季N₂O累积排放通量 (mg/m^2),常数 24 为时间换算常数, $1 \text{ d}=24 \text{ h}$ 。 D_i 为该季开始后第 i 次采样时的累积天数, F_i 为对应的N₂O排放通量 [$\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]。

1.3.2 生物量的测定 在冬小麦关键生育期测定地上部分生物量。于每个开顶式气室内随机选择长势均匀的冬小麦植株进行采样,洗净后 105°C 杀青 30 min , 80°C 烘干至恒重后称重。

1.3.3 土壤温度和含水量测定 距地表 5 cm 的土壤温度和含水量观测仪器为:土壤水分温度电导率速测仪 (Hydra Probe II, Stevens Water Monitoring Systems, USA)。

1.4 统计分析

测得的试验数据在 Office Excel 2021 中预处理,在 SPSS17.0 (SPSS Inc., Chicago, USA) 中进行单因素方差分析 (ANOVA)、重复测量方差分析 (Repeat measures ANOVA) 和 Pearson 相关性分析 (Univariate),利用最小显著性差异法 (Least significant difference, LSD) 进行多重检验。在软件 Origin 2021 (OeginLab Corp., Wellesley Hills, USA) 中采用线性和非线性回归方法研究环境因子与土壤N₂O排放通量之间的关系。

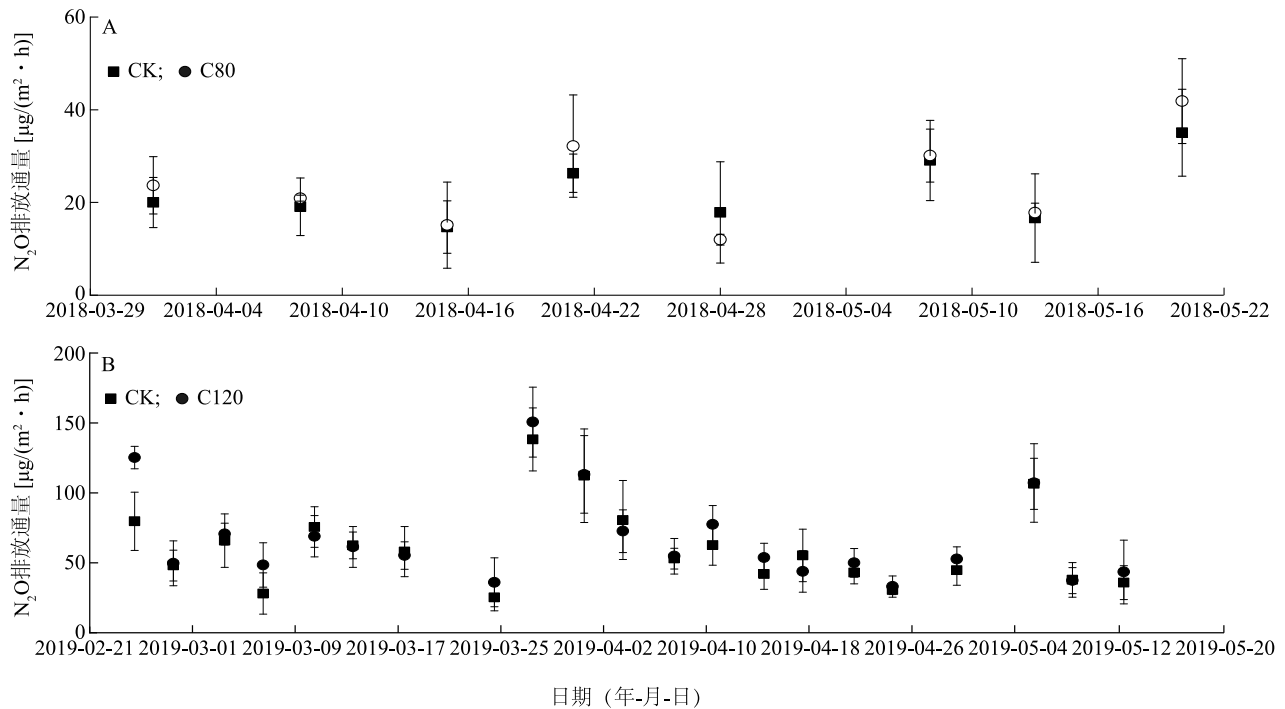
2 结果与分析

2.1 土壤N₂O排放

2.1.1 土壤N₂O排放通量 如图 1 所示,对照、C₈₀处理和 C₁₂₀处理土壤N₂O排放通量总体趋于一致,其中土壤N₂O排放峰值的出现主要是由于肥料的施用。在 2019 年 3 月 28 日拔节孕穗期施肥后出现了明显的N₂O排放峰。重复测量方差分析结果表明, C₈₀处理和 C₁₂₀处理土壤N₂O排放通量均随生育期显著变化 ($P<0.05$)。C₈₀处理和 C₁₂₀处理并未对冬小麦生长季土壤N₂O排放通量产生显著影响 ($P>0.05$)。CO₂缓增处理与生育期对土壤N₂O排放通量均无显著交互作用 ($P>0.05$)。总体来看,CO₂缓增处理并未影响土壤N₂O的排放。2017–2018 年冬小麦生长季的土壤N₂O排放通量较2018–2019 年冬小麦生长季偏低,可能是由于2017–2018 年冬小麦生长季观测开始的时间较晚,未观测到施肥后的N₂O排放峰。

2.1.2 土壤 N_2O 累积排放量 如图2所示,冬小麦各生育时期 C_{80} 处理土壤 N_2O 累积排放量与对照均无显著差异($P>0.05$)。对照冬小麦全生育期土壤 N_2O 累积排放量为 $(25.49\pm 3.33) \text{ mg/m}^2$, C_{80} 处理冬小麦全生育期土壤 N_2O 累积排放量为 $(26.83\pm 3.21) \text{ mg/m}^2$ 。在2018–2019年冬小麦生长季,对照冬小麦全生育期

土壤 N_2O 累积排放量为 $(113.06\pm 2.66) \text{ mg/m}^2$, C_{120} 处理冬小麦全生育期土壤 N_2O 累积排放量为 $(121.20\pm 9.28) \text{ mg/m}^2$ 。在观测时间段内,2018–2019年土壤 N_2O 累积排放量大于2017–2018年,可能是由于2017–2018年冬小麦生长季错过了施肥导致 N_2O 排放峰值期的观测,观测开始时间较晚。



A、B 分别是 2017–2018 年和 2018–2019 年冬小麦生长季。CK: 大气 CO_2 浓度; C_{80} : 2017–2018 年 CO_2 浓度增加 $80 \mu\text{mol}/\text{mol}$; C_{120} : 2018–2019 年 CO_2 浓度增加 $120 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 。

图 1 冬小麦生长季土壤 N_2O 排放通量

Fig.1 The N_2O emission flux from soil during winter wheat growing season

2.2 土壤-冬小麦系统 N_2O 排放

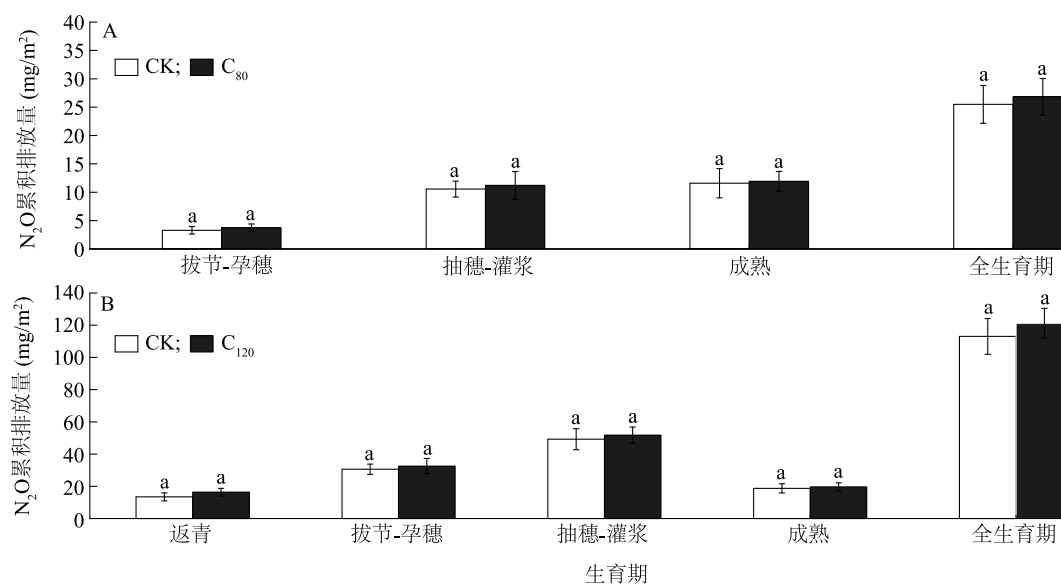
如图3所示,冬小麦对照和 C_{80} 处理土壤-冬小麦系统 N_2O 季节排放通量总体趋于一致。重复测量方差分析结果表明,土壤-冬小麦系统 N_2O 排放通量均随生育期显著变化($P<0.05$)。 C_{80} 处理并未对土壤-冬小麦系统 N_2O 排放通量产生显著影响($P>0.05$)。 CO_2 缓增处理与生育期对土壤-冬小麦系统 N_2O 排放通量无显著交互作用($P>0.05$)。总体来看, CO_2 缓增处理并未改变土壤-冬小麦系统 N_2O 的排放趋势。

如图4所示,冬小麦各生育时期 C_{80} 处理土壤-冬小麦系统 N_2O 累积排放量与对照均无显著差异($P>0.05$)。对照冬小麦全生育期土壤-冬小麦系统

N_2O 累积排放量为 $(25.99\pm 1.39) \text{ mg/m}^2$, C_{80} 处理冬小麦全生育期土壤-冬小麦系统 N_2O 累积排放量为 $(29.83\pm 4.20) \text{ mg/m}^2$ 。

2.3 N_2O 排放与相关因子的关系

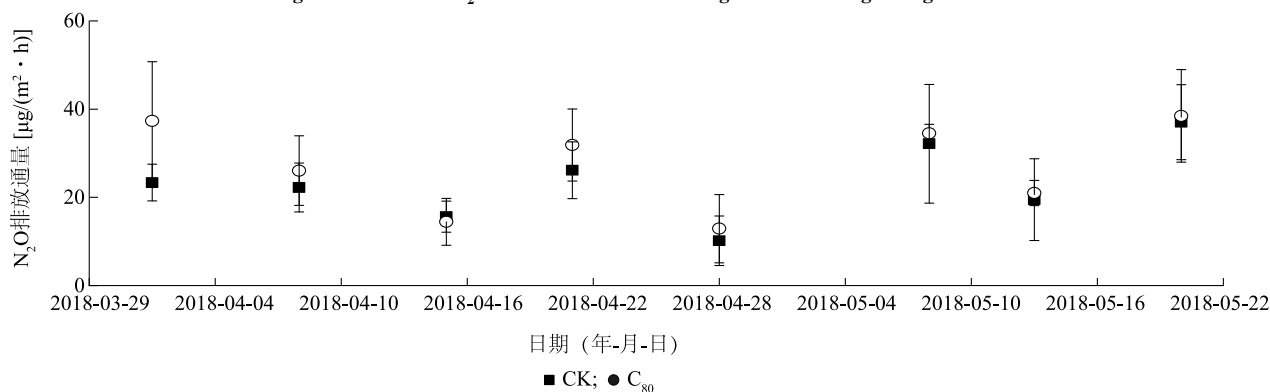
2.3.1 N_2O 排放与生物量的关系 图5A为土壤 N_2O 排放通量与小麦地上部分生物量相关关系,图5B为土壤-冬小麦系统 N_2O 排放通量与小麦地上部分生物量相关关系,结果表明,各生育期土壤 N_2O 累积排放量与该生育期地上部分生物量呈极显著正相关($P<0.01$),其 R^2 为0.622。各生育期土壤-冬小麦系统 N_2O 累积排放量与该生育期地上部分生物量呈极显著正相关($P<0.01$),其 R^2 为0.610。随生物量的增多, N_2O 累积排放量逐渐增大。



A、B 分别是2017-2018 年和2018-2019 年冬小麦生长季。CK: 大气 CO₂ 浓度; C₈₀: 2017-2018 年 CO₂ 浓度增加 80 μmol/mol; C₁₂₀: 2018-2019 年 CO₂ 浓度增加 120 μmol/mol。

图2 冬小麦生长季土壤N₂O累积排放量

Fig.2 Cumulative N₂O emission from soil during winter wheat growing season



CK: 大气 CO₂ 浓度; C₈₀: 2017-2018 年 CO₂ 浓度增加 80 μmol/mol。

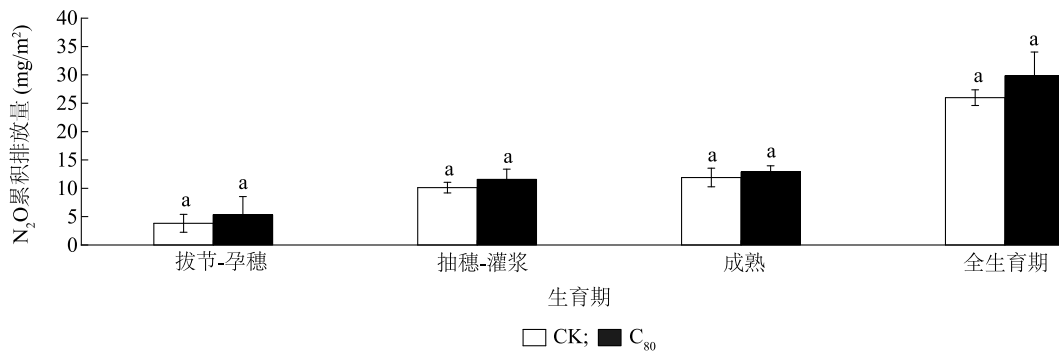
图3 2017-2018 年冬小麦生长季土壤-冬小麦系统N₂O排放通量

Fig.3 The N₂O emission flux from soil-wheat system during 2017-2018 winter wheat growing season

2.3.2 土壤N₂O排放与土壤温度的关系 如图6所示,对照、C₈₀处理和C₁₂₀处理土壤温度和土壤N₂O排放通量之间都呈二次线型关系。即随土壤温度的增加,土壤N₂O排放通量呈现先增多后减少的趋势,在18℃左右出现峰值。其中,2017-2018年冬小麦生长季C₈₀处理 R^2 为0.188 ($P < 0.05$); 2018-2019年冬小麦生长季对照 R^2 为0.091 ($P < 0.05$)、C₁₂₀处理 R^2 为0.113 ($P < 0.05$)。

2.3.3 土壤N₂O排放与土壤含水量的关系 如图7

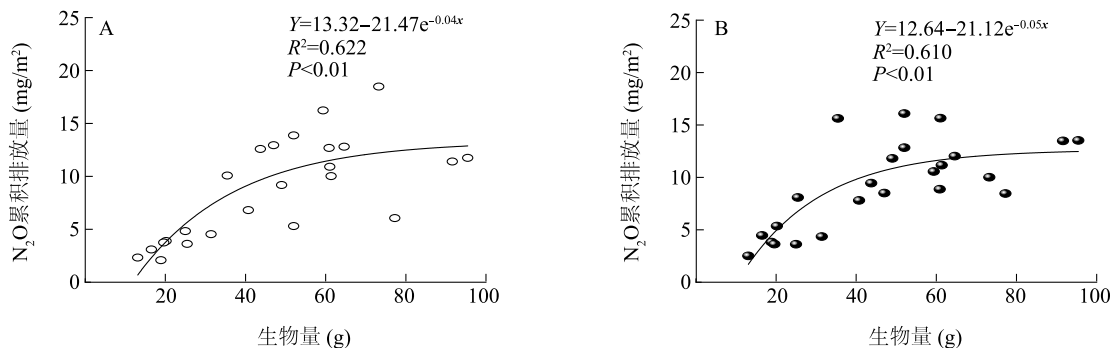
所示,对照、C₈₀处理和C₁₂₀处理土壤含水量与土壤N₂O排放通量之间存在指数型正相关。当土壤含水量升高,土壤N₂O排放通量也随之升高。在2017-2018年冬小麦生长季C₈₀处理土壤N₂O排放与土壤含水量呈显著正相关, R^2 为0.121 ($P < 0.05$); 在2018-2019年冬小麦生长季对照的土壤N₂O排放与土壤含水量呈显著正相关, R^2 为0.076 ($P < 0.05$), C₁₂₀处理土壤N₂O排放与土壤含水量呈极显著正相关, R^2 为0.338 ($P < 0.01$)。



CK: 大气 CO₂ 浓度; C₈₀: 2017-2018 年 CO₂ 浓度增加 80 μmol/mol。图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 4 2017-2018 年冬小麦生长季土壤-冬小麦系统 N₂O 累积排放量

Fig.4 Cumulative N₂O emissions from soil-wheat system during 2017-2018 winter wheat growing season



A 是土壤 N₂O 累积排放量与生物量的关系; B 为土壤-冬小麦系统 N₂O 累积排放量与生物量的关系。

图 5 冬小麦生长季 N₂O 累积排放量与生物量的关系

Fig.5 Relationship between cumulative N₂O emissions and biomass in winter wheat growing season

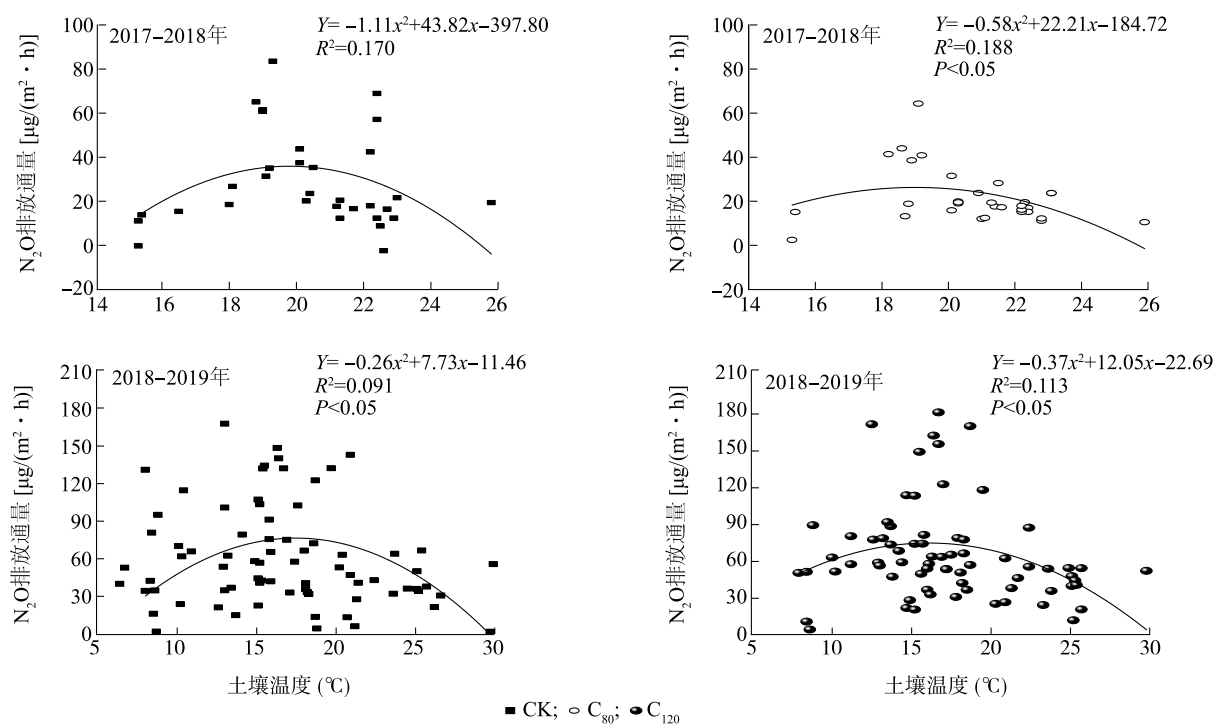
3 讨论

3.1 CO₂ 浓度缓增对冬小麦田 N₂O 排放的影响

无机氮肥是大气中 N₂O 的重要来源,更为农田 N₂O 排放提供了重要原料^[12]。肥料的施用为土壤微生物活动提供了大量氮源的同时,也对土壤硝化和反硝化作用产生了促进作用,进而促进了 N₂O 排放^[13]。本研究结果表明,小麦田会在施肥后 7 d 左右出现 N₂O 排放峰值,这与 Ineson 等^[14]的研究结果一致。

大气 CO₂ 浓度升高对土壤 N₂O 排放通量的正负效应均存在。促进效应可能包括以下 3 种机制:第一,CO₂ 浓度升高对植物根系生长有促进作用^[15],进而会有更多可利用碳通过根系分泌物进入土壤,为反硝化微生物提供了更多反应底物,从而使 N₂O 排放增多^[16];第二,CO₂ 浓度升高会提高土壤水分含量,从而使土壤微生物消耗更多的氧气^[17],缺氧会

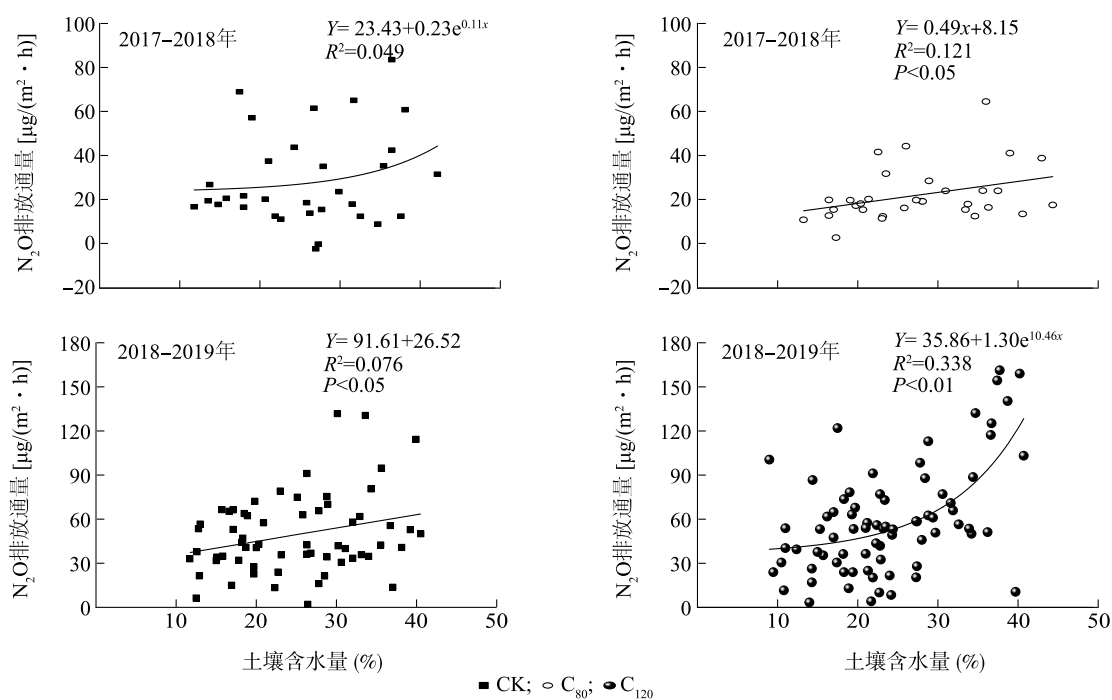
促进反硝化作用,进而增加 N₂O 排放^[18];第三,CO₂ 浓度升高对土壤硝化和反硝化细菌的增长有促进作用,进而增加 N₂O 排放量^[19]。同时,也有学者认为 CO₂ 浓度升高会对土壤 N₂O 排放产生抑制作用,高水平 CO₂ 浓度升高时,土壤 C/N 比提高^[20],导致可利用 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 含量降低,从而抑制 N₂O 的产生^[21]。林伟宏等^[22]认为大气 CO₂ 浓度升高会促进异养微生物对 N 的固定,不会增加 N₂O 排放量。本研究结果表明,CO₂ 浓度缓增对冬小麦 N₂O 排放量没有显著影响。表 2 为不同 CO₂ 升高浓度对田间 N₂O 排放量的影响。孙宝宝^[23]经田间试验发现,CO₂ 浓度缓增 (+80 μmol/mol) 并未使 N₂O 累积排放量显著增加,与本研究结果一致。究其原因,参考孙宝宝^[23]的研究结果发现 CO₂ 浓度缓增提高了氨氧化古菌 (AOA) 和氨氧化细菌 (AOB) 中硝化基因 *amoA* 的丰度,而亚硝酸还原酶基因 *nirS* 的丰度有所下降,可能会使反硝化作用减弱、硝化作用增强,正负效应叠



CK: 大气 CO₂ 浓度; C₈₀: 2017-2018 年 CO₂ 浓度增加 80 $\mu\text{mol}/\text{mol}$; C₁₂₀: 2018-2019 年 CO₂ 浓度增加 120 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 。

图6 冬小麦生长季土壤温度与土壤N₂O排放通量的关系

Fig.6 Relationship between soil temperature and soil N₂O emission flux during winter wheat growing season



CK: 大气 CO₂ 浓度; C₈₀: 2017-2018 年 CO₂ 浓度增加 80 $\mu\text{mol}/\text{mol}$; C₁₂₀: 2018-2019 年 CO₂ 浓度增加 120 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 。

图7 冬小麦生长季土壤含水量与土壤N₂O排放通量的关系

Fig.7 Relationship between soil water content and soil N₂O emission flux in winter wheat growing season

加抵消导致 N_2O 排放量增加不显著。而本研究中两个冬小麦生长季之间 N_2O 累积排放量差异较大,

考虑是由于两季观测期不同,第一季观测开始的时间较晚,错过了因肥料施用导致的 N_2O 排放峰值。

表 2 不同 CO_2 升高浓度对田间 N_2O 排放量的影响

Table 2 Effects of different elevated concentrations of CO_2 on N_2O emissions from field

研究地点	作物类型	CO_2 升高浓度 ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)	对 N_2O 排放量的影响	参考文献
印度, 克塔克	水稻	280	土壤-水稻系统 N_2O 排放量增加了 43.0%	[24]
中国, 吉林省, 白山市	森林	180	土壤 N_2O 累积排放量增加了 64.7%	[19]
印度, 克塔克	水稻	150	土壤-水稻系统 N_2O 季节排放量增加了 24.6%	[25]
中国, 江苏省, 常熟市	小麦	80	土壤-冬小麦系统 N_2O 排放量显著增加了 39.9%	[5]
中国, 江苏省, 常熟市	水稻-小麦	80	土壤和土壤-水稻系统 N_2O 累积排放量分别显著增加了 74.0% 和 62.0%; 土壤和土壤-冬小麦系统 N_2O 累积排放量分别显著增加了 24.0% 和 26.0%;	[26]
中国, 湖北省, 荆州市	水稻	60	土壤-水稻系统 N_2O 排放量增加 102.4% ~ 140.0%	[27]
美国, 亚利桑那州, 马里科帕	高粱	200	显著增加了土壤-高粱系统 N_2O 排放量	[6]
法国, 中央高原	旱地草地	200	对土壤-草地系统 N_2O 排放量没有显著影响	[28]
葡萄牙, 萨尔瓦特拉-迪马古什	水稻	130	对土壤-水稻系统 N_2O 排放量没有显著影响	[8]
中国, 江苏省, 南京市	小麦	80	对土壤-小麦系统 N_2O 排放量没有显著影响	[23]
中国, 湖北省, 荆州市	水稻	60	对土壤-水稻系统 N_2O 排放量没有显著影响	[29]
中国, 浙江省, 杭州市	水稻	280	显著降低了土壤 N_2O 排放量	[7]
美国, 怀俄明州	半干旱草原	200	显著降低土壤 N_2O 累积排放量 ($P=0.006$)	[30]
中国, 江苏省, 无锡市	小麦	200	显著降低了土壤 N_2O 排放量	[31]

有研究结果表明, CO_2 浓度缓增、骤增会对土壤 N_2O 排放产生不同的影响^[32]。王小涵^[32]经过 Meta 分析后发现, 当 CO_2 浓度增量小于 $150 \mu\text{mol}/\text{mol}$, 大气 CO_2 浓度升高对土壤 N_2O 排放的促进作用最强。而本研究结果与之不同, 大气 CO_2 浓度缓增对小麦田 N_2O 排放没有显著影响, 可能是因为除了大气 CO_2 浓度会对土壤 N_2O 排放产生影响之外, 土壤温度、土壤含水量、小麦品种、土壤质地等诸多因子也会对其产生影响^[23,33]。

3.2 N_2O 排放与土壤温度和含水量的关系

N_2O 排放会受到土壤温度的影响。有学者认为温度升高会对土壤微生物活跃性产生促进作用, 进而对硝化、反硝化过程产生影响, 促进 N_2O 排放^[33-34]。通常情况下, N_2O 排放量与土壤温度成正比, 硝化和反硝化细菌的最适温度为 $25 \sim 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[35]。于海洋等^[36]发现, 水稻田间 N_2O 排放量和土壤温度之间呈显著正相关。胡正华等^[37]研究结果表明, 土壤温度与 N_2O 排放量呈指数型正相关。而本研究发现, 二者呈二次线型关系, 即土壤 N_2O 排放通量随土

壤温度的提高先增多, 当土壤温度到 $18 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 土壤 N_2O 排放通量达到峰值后开始减少。这可能是由于在冬小麦生长前期温度较低, 此时施用拔节孕穗肥土壤 N_2O 排放通量较高, 当土壤温度达到 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上时, 小麦已逐渐进入成熟期, 土壤 N_2O 排放通量开始减少。 CO_2 浓度缓增处理降低了拟合曲线的 p 值, 提高了 R^2 值, 说明 CO_2 浓度缓增提高了土壤温度与 N_2O 排放通量的相关性。另外, 土壤温度也可以通过改变土壤含水量和通气状况来改变微生物的群落, 使土壤 N_2O 排放发生变化^[7]。

有研究结果表明, 土壤水分状况对 N_2O 排放量有较大影响^[33]。张静等^[38]发现, 土壤含水量与麦田 N_2O 排放呈显著正相关 ($P<0.05$)。封克等^[39]发现, 当土壤水分含量为 $45\% \sim 75\%$, N_2O 排放量较高。熊浩等^[40]发现, 通常在降雨后会出现 N_2O 排放峰, N_2O 排放量与 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 土壤水分含量之间呈正相关, 当土壤含水量大于 37% 时, 有利于 N_2O 的排放。本研究结果表明, 土壤含水量与 N_2O 排放之间存在指数型正相关。在 2017–2018 年冬小麦生长季的试

验中发现,5月6日降水后导致土壤含水量有所升高,在2 d后出现了N₂O排放峰。CO₂浓度缓增处理使拟合曲线的 P 值降低、 R^2 值升高,说明CO₂浓度缓增提高了土壤含水量与N₂O排放的相关性。另外,土壤含水量提高会促进土壤中微生物活性,同时,也会使土壤养分流动性提高,从而促进微生物的硝化和反硝化作用^[39]。

4 结论

大气CO₂浓度缓增并没有对土壤、土壤-冬小麦系统N₂O排放通量产生影响。土壤、土壤-冬小麦系统N₂O排放通量与冬小麦地上部分生物量之间呈极显著正相关($P<0.01$);土壤N₂O排放通量与土壤温度呈二次线型显著相关($P<0.05$),与土壤含水量之间呈指数型显著正相关($P<0.05$)。大气CO₂浓度缓增处理使土壤N₂O排放通量与土壤温度、土壤含水量拟合曲线的 R^2 值呈增加趋势, P 值降低,说明CO₂缓增处理一定程度上提高了土壤温度和土壤含水量与N₂O排放的相关性。

参考文献:

- [1] WMO. WMO greenhouse gas bulletins: the state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2022 [R]. Geneva: WMO, 2023.
- [2] GENTHON C, BARNOLA J M, RAYNAUD D, et al. Vostok ice core: climatic response to CO₂ and orbital forcing changes over the last climatic cycle [J]. *Nature*, 1987, 329: 414-418.
- [3] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working groups I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [4] 国家统计局. 2021 中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [5] 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.
- [6] WELZMILLER J T, MATTHIAS A D, WHITE S, et al. Elevated carbon dioxide and irrigation effects on soil nitrogen gas exchange in irrigated sorghum [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72 (2): 393-401.
- [7] SUN X, HAN X G, PING F, et al. Effect of rice-straw biochar on nitrous oxide emissions from paddy soils under elevated CO₂ and temperature [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 628/629: 1009-1016.
- [8] PEREIRA J, FIGUEIREDO N, GOUFO P, et al. Effects of elevated temperature and atmospheric carbon dioxide concentration on the emissions of methane and nitrous oxide from Portuguese flooded rice fields [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 80: 464-471.
- [9] 党慧慧, 刘 超, 伍翥嵘, 等. 不同播期粳稻田甲烷排放及综合效益研究 [J]. *生态环境学报*, 2021, 30 (7): 1436-1446.
- [10] 商东耀. 不同 CO₂ 浓度升高水平对稻麦农田呼吸速率和 N₂O 通量的影响 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020.
- [11] WU Z R, WANG Y Y, LIU C, et al. Characteristics of soil N₂O emission and N₂O-producing microbial communities in paddy fields under elevated CO₂ concentrations [J]. *Environmental Pollution*, 2023, 318: 120872.
- [12] 侯爱新, 陈冠雄, VANCLEEMPOT O. 不同种类氮肥对土壤释放 N₂O 的影响 [J]. *应用生态学报*, 1998 (2): 176-180.
- [13] 黄 耀. 地气系统碳氮交换——从实验到模型 [M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [14] INESON P, COWARD P A, HARTWIG U A. Soil gas fluxes of N₂O, CH₄ and CO₂ beneath *Lolium perenne* under elevated CO₂: The Swiss free air carbon dioxide enrichment experiment [J]. *Plant and Soil*, 1998, 198 (1): 89-95.
- [15] NORBY R J, JOANNE L, REILLY C D, et al. Fine-root production dominates response of a deciduous forest to atmospheric CO₂ enrichment [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101 (26): 9689-9693.
- [16] KUYPERS M M M, MARCHANT H K, KARTAL B. The microbial nitrogen-cycling network [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2018, 16 (5): 263-276.
- [17] HUNGATE B A, DIJKSTRA P, ZHOUTING W, et al. Cumulative response of ecosystem carbon and nitrogen stocks to chronic CO₂ exposure in a subtropical oak woodland [J]. *New Phytologist*, 2013, 200 (3): 753-766.
- [18] BUTTERBACH B K, DANNENMANN M. Denitrification and associated soil N₂O emissions due to agricultural activities in a changing climate [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2011, 3 (5): 389-395.
- [19] SUN J F, IA Z W, HE T X, et al. Ten years of elevated CO₂ affects soil greenhouse gas fluxes in an open top chamber experiment [J]. *Plant and Soil*, 2017, 420 (1/2): 435-450.
- [20] LIU S. Climatic role of terrestrial ecosystem under elevated CO₂: a bottom-up greenhouse gases budget [J]. *Ecology Letters*, 2018, 21 (7): 1108-1118.
- [21] LEIFELD J. Distribution of nitrous oxide emissions from managed organic soils under different land uses estimated by the peat C/N ratio to improve national GHG inventories [J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 631/632: 23-26.
- [22] 林伟宏, 张福锁, 白克智. 大气 CO₂ 浓度升高对植物根际微生物生态系统的影响 [J]. *科学通报*, 1999 (16): 1690-1696.
- [23] 孙宝宝. 升温和大 CO₂ 浓度升高下冬小麦季固碳减排措施及机理研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
- [24] KUMAR A, PADHY S R, DAS R R, et al. Elucidating relationship between nitrous oxide emission and functional soil microbes from tropical lowland rice soil exposed to elevated CO₂: a path

- modelling approach[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2021, 308:107268.
- [25] BHATTACHARYA P, ROY K S, NEOGI S, et al. Impact of elevated CO₂ and temperature on soil C and N dynamics in relation to CH₄ and N₂O emissions from tropical flooded rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Science of The Total Environment*, 2013, 461:601-611.
- [26] 周超. 温度和 CO₂ 浓度升高对稻麦轮作系统 CH₄ 和 N₂O 排放的影响: T-FACE 平台观测研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- [27] WANG B, LI J L, WAN Y F, et al. Responses of yield, CH₄ and N₂O emissions to elevated atmospheric temperature and CO₂ concentration in a double rice cropping system[J]. *European Journal of Agronomy*, 2018, 96:60-69.
- [28] CANTAREL A A M, BLOOR J M G, POMMIER T, et al. Four years of experimental climate change modifies the microbial drivers of N₂O fluxes in an upland grassland ecosystem [J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(8):2520-2531.
- [29] 周伟平. 大气温度和二氧化碳浓度升高对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及微生物的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.
- [30] DIJKSTRA F A, MORGAN J A, FOLLETT R F, et al. Climate change reduces the net sink of CH₄ and N₂O in a semiarid grassland[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(6):1816-1826.
- [31] 徐仲均. 大气 CO₂ 浓度升高对稻-麦轮作农田温室气体排放影响的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(大气物理研究所), 2005.
- [32] 王小涵. CO₂ 浓度增加和温度升高对土壤 N₂O 排放的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
- [33] 朱永官, 王晓辉, 杨小茹, 等. 农田土壤 N₂O 产生的关键微生物过程及减排措施[J]. *环境科学*, 2014, 35(2):792-800.
- [34] AGEHARA S, WARNCKE D. Soil moisture and temperature effects on nitrogen release from organic nitrogen sources[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(6):1844-1855.
- [35] 朱兆良, 文孝国. 土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992.
- [36] 于海洋, 黄琼, 王天宇, 等. 大气 CO₂ 摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田 N₂O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42(8):3924-3930.
- [37] 胡正华, 周迎平, 崔海玲, 等. 昼夜增温对大豆田土壤 N₂O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2013, 34(8):2961-2967.
- [38] 张静, 李虎, 王立刚, 等. 冬小麦/大葱轮作体系 N₂O 排放特征及影响因素研究[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(8):1639-1646.
- [39] 封克, 殷士学. 影响氧化亚氮形成与排放的土壤因素[J]. *土壤学进展*, 1995, 23(6):35-42.
- [40] 熊浩, 张保成, 李建柱, 等. 灌水量对冬小麦农田土壤 N₂O 与 CO₂ 排放的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(9):41-50.

(责任编辑: 成纾寒)