中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture

施氮量对砂姜黑土小麦玉米轮作体系N_2O排放的影响

吕金岭，高燕哺，李太魁，孔海江，张金平，寇长林

Effect of nitrogen fertilizer amount on N_2O emission from wheat-maize rotation system in lime concretion black soil

LYU Jinling, GAO Yanbu, LI Taikui, KONG Haijiang, ZHANG Jinping, and KOU Changlin

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12357/cjea.20210444

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

林地转变为耕地对紫色土N_2O排放的影响

Impact of conversion from forestland to cropland on soil N_2O emission from purplish soil

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(2): 214–221

施肥方式对紫色土农田生态系统N_2O和NO排放的影响

Effects of fertilization regimes on N_2O and NO emissions from agro–ecosystem of purplish soil

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(2): 203–213

氮肥水平对稻田细菌群落及N_2O排放的影响

Effect of nitrogen fertilizer level on bacterial community and N_2O emission in paddy soil

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(9): 1266–1275

施氮及添加硝化抑制剂对苜蓿草地N_2O排放的影响

Effects of nitrogen application and nitrification inhibitor addition on N_2O emissions in *Medicago sativa* L. grassland

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(3): 317–327

华北平原农田N_2O排放通量的高频动态观测

High–frequency dynamic observation of N_2O emission flux from cropland in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(2): 195–202

植物排放N_2O研究进展

Advances in plant nitrous oxide (N_2O) emissions

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(2): 345–354

关注微信公众号，获得更多资讯信息

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 11 月 第 29 卷 第 11 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Nov. 2021, 29(11): 1846−1856

DOI: 10.12357/cjea.20210444

吕金岭, 高燕哺, 李太魁, 孔海江, 张金平, 寇长林. 施氮量对砂姜黑土小麦−玉米轮作体系 N_2O 排放的影响[J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2021, 29(11): 1846−1856

LYU J L, GAO Y B, LI T K, KONG H J, ZHANG J P, KOU C L. Effect of nitrogen fertilizer amount on N_2O emission from wheat-maize rotation system in lime concretion black soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(11): 1846−1856

施氮量对砂姜黑土小麦−玉米轮作体系 N_2O 排放的影响*

吕金岭[1,2], 高燕哺[3], 李太魁[1,2], 孔海江[4], 张金平[5], 寇长林[1,2**]

(1. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所/河南省农业生态环境重点实验室 郑州 450002; 2. 农业农村部原阳农业环境与耕地保育科学观测实验站 新乡 453500; 3. 河南省生态环境监测中心 郑州 450046; 4. 中国气象局-河南省农业气象保障重点实验室 郑州 450003; 5. 新乡市气象局 新乡 453003)

摘 要: 砂姜黑土是黄淮海平原重要的中低产土壤, 由于其剖面含有砂姜层, 易产生裂隙, 影响了氮素在土壤剖面的迁移分布, 可能导致砂姜黑土的 N_2O 排放存在一定的独特性。基于此, 本研究以砂姜黑土小麦-玉米轮作体系为研究对象, 设置 4 个处理, 分别为不施肥 (CK)、传统施肥 (TR)、优化施肥 (OPT) 和再优化施肥 (ZOPT), 通过静态箱-气相色谱法结合常规土壤参数的监测与分析, 探究砂姜黑土不同施氮条件下 N_2O 排放特征、累积排放量及关键驱动因素。结果显示, 砂姜黑土小麦季的 N_2O 平均排放通量为 14.2~21.6 $\mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$, 累积排放量为 0.82~1.24 $kg(N) \cdot hm^{-2}$; 玉米季的 N_2O 平均排放通量为 14.4~24.5 $\mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$, 累积排放量为 0.42~0.71 $kg(N) \cdot hm^{-2}$; 不同处理小麦季的 N_2O 累积排放量均高于玉米季。小麦季追肥期与基肥期的 N_2O 累积排放量分别为 0.27~0.41 $kg(N) \cdot hm^{-2}$ 和 0.55~0.83 $kg(N) \cdot hm^{-2}$, 玉米季分别为 0.18~0.30 $kg(N) \cdot hm^{-2}$ 和 0.24~0.41 $kg(N) \cdot hm^{-2}$, 追肥期 N_2O 累积排放量均高于基肥期。相关性分析结果显示, CK 处理的 N_2O 排放量与土壤温度、含水量和硝酸盐含量均表现出明显的多元线性相关 ($P<0.05$), TR、OPT 和 ZOPT 仅与土壤硝酸盐含量呈极显著多元线性相关 ($P<0.01$), 而与土壤温度和土壤含水量未表现明显的相关性, 说明施肥条件下, 土壤硝酸盐含量的高低成为影响砂姜黑土农田土壤 N_2O 排放最关键的影响因素。除此之外, 不同施氮量的 N_2O 累积排放量差别明显 ($P<0.05$), TR 处理的 N_2O 排放量最高, 小麦玉米季分别为 1.24 $kg(N) \cdot hm^{-2}$ 和 0.71 $kg(N) \cdot hm^{-2}$, 显著高于 OPT 处理 [0.99 $kg(N) \cdot hm^{-2}$ 和 0.51 $kg(N) \cdot hm^{-2}$] 和 ZOPT 处理 [0.82 $kg(N) \cdot hm^{-2}$ 和 0.42 $kg(N) \cdot hm^{-2}$]。无论小麦季还是玉米季 N_2O 的累积排放量均随施氮量的增加而呈指数增加趋势, 相关性系数分别达 0.997 和 0.977 ($P<0.05$), 说明砂姜黑土传统施氮 N_2O 存在过量排放问题。总而言之, 尽管与其他土壤相比, 砂姜黑土不属于 N_2O 高排土壤, 但传统施氮量导致的 N_2O 排放量仍不可忽视。

关键词: 砂姜黑土; N_2O 排放; 施氮量; 土壤硝酸盐含量; 静态箱-气相色谱法; 小麦-玉米轮作

中图分类号: S19 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Effect of nitrogen fertilizer amount on N_2O emission from wheat-maize rotation system in lime concretion black soil*

LYU Jinling[1,2], GAO Yanbu[3], LI Taikui[1,2], KONG Haijiang[4], ZHANG Jinping[5], KOU Changlin[1,2**]

* 国家自然科学基金项目 (41807098) 和国家重点研发计划项目 (2017YFD0800600, 2017YFC0212400) 资助

** 通信作者: 寇长林, 研究方向为农田土壤肥力提升。E-mail: koucl@126.com

吕金岭, 研究方向为农田氮素循环和气体排放。E-mail: lvjinling2008@163.com

收稿日期: 2021-07-12 接受日期: 2021-08-05

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (41807098) and the National Key Research and Development Program of China (2017YFD0800600, 2017YFC0212400).

** Corresponding author, E-mail: koucl@126.com

Received Jul. 12, 2021; accepted Aug. 5, 2021

(1. Institute of Plant Nutrition, Resources and Environmental Science, Henan Academy of Agricultural Sciences / Henan Key Laboratory of Agricultural Eco-Environment, Zhengzhou 450002, China; 2. Yuanyang Scientific Observing and Experimental Station of Agro-Environment and Arable Land Conservation of Ministry of Agriculture and Rural Affaires, Xinxiang 453500, China; 3. Henan Ecological Environment Monitoring Center, Zhengzhou 450046, China; 4. Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique - China Meteorological Administration, Zhengzhou 450003, China; 5. Xinxiang Meteorological Office, Xinxiang 453003, China)

Abstract: Lime concretion black soil is an important medium and low-yield soil in the Huanghuaihai Plain. It is prone to cracks because containing a high clay and sand ginger layer, making it unique in nitrogen transport. This study used the wheat and corn rotation system in lime concretion black soil as the research object, researching the N_2O emission characteristics and key driving factors by static box-gas chromatography methods. The experiment included four treatments: no fertilization (CK), traditional fertilization (TR), optimized fertilization (OPT), and re-optimized fertilization (ZOPT). Results showed that the average emission flux of N_2O in the wheat season ranged from 14.2 to 21.6 $\mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$, and the cumulative emission amount ranged from 0.82 to 1.24 $kg(N) \cdot hm^{-2}$; the average emission flux of N_2O in the corn season ranged from 14.4 to 24.5 $\mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$, the cumulative emission amount ranged from 0.42 to 0.71 $kg(N) \cdot hm^{-2}$; the N_2O emission in the wheat season was higher than that in the corn season, and the N_2O emission in the top dressing period of the two seasons was higher than that in the basal fertilizer period, demonstrating that the wheat season and top dressing period were high N_2O emission periods for lime concretion black soil. The correlation analysis results showed that N_2O emission of CK showed a significant multiple linear correlation with soil temperature, water content, and NO_3^--N content ($P<0.05$); whereas that of TR, OPT, and ZOPT only showed a significant multiple linear correlation with soil nitrate ($P<0.01$). There was no significant correlation between soil temperature and soil water content (except in individual cases), indicating that under fertilization conditions, the level of soil nitrate content was the most critical factor affecting N_2O emissions from the farmland of lime concretion black soil. In addition, the cumulative N_2O emissions of different nitrogen application rates were significantly different ($P<0.05$), and the N_2O emissions of the TR treatment were the highest, which were 1.24 $kg(N) \cdot hm^{-2}$ and 0.71 $kg(N) \cdot hm^{-2}$, respectively, in the wheat and corn seasons, significantly higher than those of OPT treatment [0.99 $kg(N) \cdot hm^{-2}$ and 0.51 $kg(N) \cdot hm^{-2}$] and ZOPT treatment [0.82 $kg(N) \cdot hm^{-2}$ and 0.42 $kg(N) \cdot hm^{-2}$]. The cumulative emissions of N_2O in both the wheat and corn seasons showed an exponentially increasing trend with the increase in nitrogen application, with the correlation coefficients reaching 0.997 and 0.977 ($P<0.05$), respectively, indicating that the traditional lime concretion black soil nitrogen application had the problem of excessive emissions of N_2O. Overall, compared with other soils, although lime concretion black soil is not a high-emission soil of N_2O, the N_2O emission caused by higher nitrogen application cannot be ignored.

Keywords: Lime concretion black soil; N_2O emission; Nitrogen fertilizer amount; Soil nitrate content; Static chamber-gas chromatography; Wheat and corn rotation

IPCC 指出 N_2O 气体是全球增温的三大温室气体之一[1]。而大量的研究证明, 农田是 N_2O 气体的主要排放源, 其排放量已经占到世界 N_2O 总排放的 60%[2]。中国农田 N_2O 排放量已经占到中国 N_2O 排放总量的 79.8%, 显著高于世界平均水平[3-4]。所以, 如何降低农田土壤 N_2O 排放是当前中国农业应对全球气候变化亟待解决的问题之一[5]。然而导致农田土壤 N_2O 排放的因素很多[6-7], 除了一些关键的环境因子和施肥方式之外, 土壤质地、剖面结构和理化性状对 N_2O 的排放也产生重要的影响[8-9]。所以, 针对一些具有典型地域特征土壤 N_2O 气体的定量测定, 对于未来农田温室气体的精确评估有着积极的作用[10]。

砂姜黑土广泛分布在我国黄淮海平原、长江中下游等地, 总面积约 371 万 hm^2, 是我国最主要的中低产土壤之一[11]。以往的研究发现, 多发性障碍因子的存在导致砂姜黑土肥料氮去向不明[12]。例如, 相关研究显示砂姜黑土的氨挥发量较低[13], 铵态氮与硝态氮 (Nmin) 淋溶损失及土壤剖面积累不高[14], 小麦 (*Triticum aestivum*)、玉米 (*Zea mays*) 带走的氮素量并不显著高于其他土壤[15], 所以砂姜黑土极可能存在其他显著的氮素损失过程。同时, 由于砂姜黑土耕层以下存在水氮难以逾越的障碍层, 导致氮素易在表层累积, 而黏土含量高易产生多发性裂隙[16], 这些特点是否导致砂姜黑土有高的 N_2O 排放还并不清楚。以往关于砂姜黑土农田 N_2O 排放的研究主要集中在砂姜黑土硝化与反硝化反应的培养试验, 而其结果显示砂姜黑土的 N_2O 排放量并不显著高于其他土壤类型[16-17]。但这个结果不能代表砂姜黑土农田 N_2O 真实排放值, 因为培养条件下忽略了砂姜黑土农田所处的环境条件, 改变了阻隔水氮下移的砂姜层, 同时人为培养试验难以准确模拟砂姜黑土田间条件下易产生多发性裂隙这一特点。所以, 砂姜黑土小麦玉米轮作季 N_2O 排放量如何, 存在哪些独特的排放特征需要深入研究。

基于此, 本研究以豫南典型砂姜黑土小麦-玉米轮作为研究对象, 设置不同施氮量, 利用静态箱/气相色谱法探究砂姜黑土 N_2O 排放通量及季节性变化特征及关键影响因子, 为未来砂姜黑土氮素的高效利用以及 N_2O 的合理减排提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验区位于河南省原阳县祝楼乡的农业部原阳农业环境与耕地保育科学观测实验站 (113°42′57″N, 35°5′56″E), 该地区属于暖温带大陆性季风气候, 年平均气温为 14.4 ℃, 多年平均降水量为 549.9 mm, 降雨主要集中在 6、7、8 月份, 约占全年降雨的 60%, 无霜期 210~220 d, 全年日照时数 2300~2600 h。小麦-玉米轮作为该地区的主要种植模式。供试土壤为典型脱潜育化砂姜黑土 (耕层已经熟化)。其耕层 20 cm 土壤主要理化性质如下: 土壤 pH 为 6.8, 呈弱酸偏中性, 土壤含全氮 0.87 $g·kg^{-1}$、全磷 0.45 $g·kg^{-1}$、有机质 15.98 $g·kg^{-1}$、铵态氮 0.17 $mg·kg^{-1}$、硝态氮 7.15 $mg·kg^{-1}$、交换性钙 4.02 $g·kg^{-1}$、交换性钾 136.90 $mg·kg^{-1}$、交换性镁 406.45 $mg·kg^{-1}$、速效磷 22.80 $mg·kg^{-1}$、可溶性碳 0.13 $g·kg^{-1}$ 和微生物碳 99.0 $mg·kg^{-1}$。N_2O 气体采集期间平均温度及降雨量如图 1 所示。

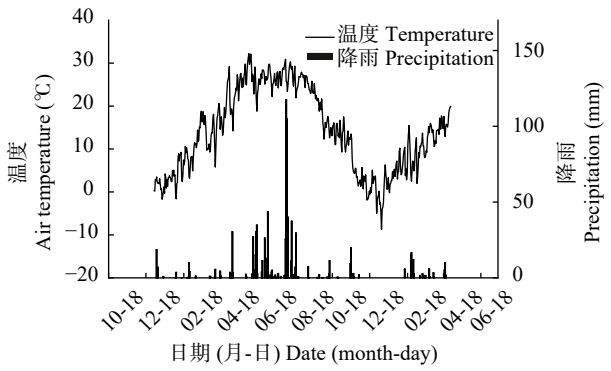

图 1 2019—2021 年试验期间的气温与降水量

Fig. 1 Temperature and precipitation during the experiment period in 2019−2021

1.2 试验设置

试验开始于 2019 年 10 月初, 划分小区并设置 4 个施氮量处理, 分别为不施肥 (CK)、传统施肥 (TR)、优化施肥 (OPT) 和再优化施肥 (ZOPT)。小区面积为 9 m^2, 每个处理 3 个重复, 小区随机区组排列; 试验各小区均间隔 1 m, 并用高 10 cm 的土埂围起, 防止降雨或者灌溉过程中的水氮交互污染。试验处理中所用肥料为尿素 (含氮 46.7%)、过磷酸钙 (12% P_2O_5) 和氯化钾 (60% K_2O)。氮按照传统施用量 250 $kg·hm^{-2}$ 进行施用, 磷和钾都按照 90 $kg·hm^{-2}$ 进行施用, OPT 和 ZOPT 分别在传统施氮的基础上减少 30 $kg(N)·hm^{-2}$ 和 60 $kg(N)·hm^{-2}$, 磷、钾肥施用量各处理相同 (CK 除外)。基肥期氮素施用量占总量的 60%, 追肥期氮素施用量占总量 40%, 磷钾肥均一次性底施, 小麦季和玉米季的施用量相同 (表 1)。为了与大田施肥方式一致, 玉米基肥期采取模拟麦茬间种肥同播 (不同行) 的方式, 播种深度为 5 cm, 施肥深度大致为 10 cm, 追肥期为撒施后灌溉; 小麦基肥期采取撒施后人工翻耕的方式, 追肥期同样采取撒施灌溉方式。玉米季选用‘德单 40’作为试验品种, 播种施肥日期为 6 月 25 日, 按照行距 60 cm、密度 67 500 $株·hm^{-2}$ 播种, 追肥期在 8 月 2 日 (大喇叭口期), 收获期为 9 月 30 日。小麦季选用‘周麦 32’为试验对象, 播种前将前茬玉米收获后粉碎平铺于地表, 并进行人工翻耕和耙地, 保持地面平整, 于 10 月 22 日播种施肥, 播种量为每公顷 187.5 kg; 追肥期在 2021 年 2 月 26 日, 小麦于 6 月 1 日收获。试验开展期间, 根据病虫草害发生情况做好除草及病虫草害的防治工作。

1.3 N_2O 气体排放试验

小麦基肥 (2019 年 10 月) 开展 N_2O 排放预试验, 并调整试验装置和采集方法, 于 2020 年 2 月中下旬 (小麦追肥期) 正式开始 N_2O 气体排放试验, 试验截至 2021 年 5 月, 共 1 年半时间。N_2O 气体采用静态暗箱-气相色谱法采集并分析。每个处理设置 3 个气体采样箱, 长宽依据小麦、玉米行间距设置, 以确保代表整个田块。采样箱由地上和地下 (箱体和底座) 两部分构成, 为不锈钢装置, 箱体大小为 30 cm×40 cm×50 cm, 箱体四周用 3 cm 厚的塑料泡沫包裹, 并在表层附锡箔纸, 以防止太阳辐射造成的内外过高的温度差异 (图 2)。为了保障收集气体的均匀性, 试验箱内抽气管采取螺旋式结构, 螺旋至箱体中间, 并将中间位置的铜管挖 5 个均匀采气小孔, 以均匀获取箱内气体。下部底座设置 5 cm 高洼槽, 添水后用于密封采样箱。气体采集频率不等, 对于施肥、灌溉期, 采取每周 3~5 次采集频率, 对于其他时期, 采取每周 1~2 次的采集频度, 冬季采取 2~3 周采集一次气体。气体采集时间为每天 9: 00—11: 00。采样前, 贮备好一次性注射器、采气袋, 并预先将底座水槽注入适量的水; 试验开始后, 将顶箱罩放置在已预先安好的地箱基座上, 利用注射器采集箱内气体, 在 0 min、15 min、30 min、45 min 时间内取气体样品, 每次抽取气体量为 50~60 mL, 并注入铝制密封袋中,

表 1　砂姜黑土小麦-玉米轮作农田不同施肥处理的施肥量

Table 1　Fertilization rates of different fertilization treatments of wheat and corn rotation cropland in lime concretion black soil

$kg \cdot hm^{-2}$

作物 Crop	处理 Treatment	氮肥 N fertilizer			磷肥 P_2O_5	钾肥 K_2O
		总量 Total	基肥 Basal	追肥 Topdressing		
小麦 Wheat	CK	0	0	0		
	TR	250	150	100	90	90
	OPT	220	132	88	90	90
	ZOPT	190	114	76	90	90
玉米 Maize	CK	0	0	0		
	TR	250	150	100	67.5	67.5
	OPT	220	132	88	67.5	67.5
	ZOPT	190	114	76	67.5	67.5

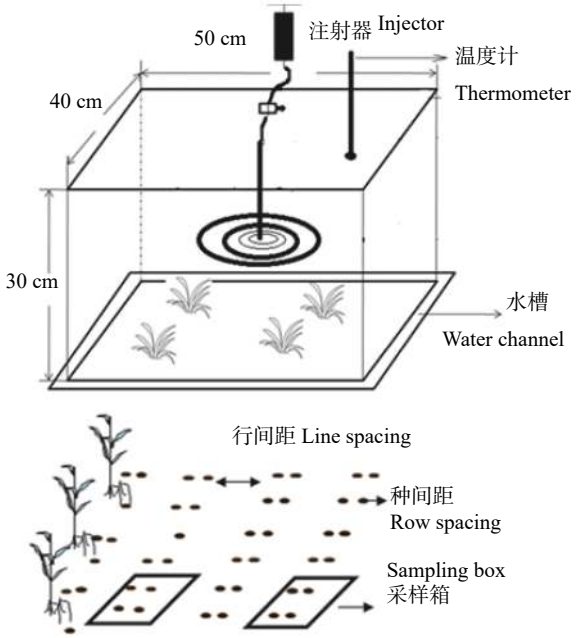

图 2　气体采样装置和田间布置图

Fig. 2　Gas sampling device and field layout

低温保存, 2~3 d 内测试完毕。同时记录采样时间和箱内温度, 5 cm、10 cm 和 20 cm 土壤温度。N_2O 浓度由安捷伦 (Agilent)7890 气相色谱分析仪进行分析。

1.4　样品采集与测定

土壤样品采集: 分别于小麦和玉米播种前采集耕层 (0~20 cm) 土样, 风干过筛后, 分析测定 pH、有机质、全氮、有效磷和速效钾含量。其中 pH 采用 1∶2.5 的土水比制备土壤悬液, 电位计法测定; 土壤铵态氮和硝态氮采用 2.0 $mol \cdot L^{-1}$ 的氯化钾溶液浸提, 振荡过滤后用流动注射分析仪 (Seal AA3) 分析测定; 土壤有机质、全氮、速效磷、交换性钾及其他指标均采用传统农化分析方法测定, 具体方法见鲍士旦的《土壤农化分析法》[18]。除此之外, N_2O 气体收集时, 同时采集 0~20 cm 的土样, 测定含水率、铵态氮与硝态氮含量, 用于后期相关性的建立。

植株样品采集: 小麦和玉米收获后, 按照常规测产方法测定作物产量和地上部生物量, 同时烘干部分秸秆和籽粒, 粉碎后用于分析小麦和玉米籽粒与秸秆重的全氮含量; 小麦采集 1 样行, 玉米采集 10 株, 进行常规烤种处理。田间安装自动土壤监测站 (SP 000 数据采集器和 5TE 三参数探头), 实时监测土壤体积含水率、电导率和温度动态。

1.5　数据处理

静态箱-气相色谱法主要涉及气体交换通量估算和累积排放量估算。

气体交换通量 (F): 采集后的气体通过气相色谱法测定后, 依据峰面积与标准气体浓度数值对比, 然后计算获得。

箱体内所测样品的 N_2O 浓度采用以下公式计算:

$$F = \rho \times H \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{273}{273 + T} \tag{1}$$

式中: F 为测定气体的交换通量 ($\mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$), ρ 为标准状态下 N_2O 气体密度 (1.977 $g \cdot L^{-1}$), H 为气室高度 (m), Δc 为 Δt 时间内箱内气体质量和混合比浓度的变化, $\Delta c/\Delta t$ 为箱内气体浓度变化 ($\mu g \cdot h^{-1}$), T 为采样箱内平均温度 (℃)。F 为负值时表示吸收, 为正值时表示排放。

生育期累积排放量 (C):

$$C = \sum_{i=1}^{n} (F_{i+1} + F_i)/2 \times (d_{i+1} - d_i) \times 24 \times 0.01 \tag{2}$$

式中: C 为气体累积排放量 ($kg \cdot hm^{-2}$), F 为 N_2O 气体排放通量 ($mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$), i 为第 i 次采样, ($d_{i+1}-d_i$) 为相邻两次采样间隔天数, n 为采样次数。0.01 为转换系数, 可以将单位 $mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ 转换为 $kg \cdot hm^{-2}$。

所有图片绘制采用 Origin 2018 软件, 数据计算和统计分析采用 SPSS 19 和 Microsoft excel 2017。

2 结果与分析

2.1 砂姜黑土农田耕层土壤含水量、电导率及地表温度动态变化特征

砂姜黑土耕层 (0~20 cm) 土壤容积含水量为 0.24~0.34 $m^3 \cdot m^{-3}$, 其中 20 cm 处的含水量整体高于 5 cm 和 10 cm 处, 且变化幅度更小, 说明砂姜黑土地下层土壤可能有较好的保水性能。自 2020 年 1 月到 7 月底, 不同深度土壤的温度变化呈明显上升趋势, 之后开始下降, 到 1 月初温度达最低值, 之后温度开始缓慢回升。值得注意的是, 不同深度的土壤电导率差别明显, 尤其5 cm 和 10 cm 处的电导率自 2020 年 1 月份开始明显下降, 后期逐渐呈现较低值, 并处于稳定状态; 而 20 cm 处在 8 月之后的电导率基本呈上升趋势, 10 月份达最高值, 之后缓慢下降。6 月之前 20 cm 土壤的电导率小于 5 cm 和 10 cm, 而 6 月份之后 20 cm 电导率为 0.1~0.4 $dS \cdot m^{-1}$ (图 3), 明显高于其他两层, 这可能与硝酸盐在 20 cm 深度土壤积累有关。

2.2 砂姜黑土小麦玉米轮作体系 N_2O 排放损失动态特征

砂姜黑土 N_2O 排放试验开始于 2020 年 2 月中旬, 恰好为小麦追肥期, 此时 N_2O 排放呈明显增加趋势, 后迅速下降; 6 月份玉米季两次施肥期的 N_2O 排放出现两个峰值, 并在施肥后持续 10 d 左右, 后迅速降低; 小麦季同样出现两次明显峰值, 同样在施肥一周后显著降低, 这与施肥后铵态氮或者硝酸盐的急剧升高有密切关系。对比两季作物两次施肥期的排放峰值, 发现无论小麦季还是玉米季追肥期的 N_2O 排放量均显著高于基肥期, 尤其小麦追肥期的 N_2O 排放峰值为 142~193 $\mu g(N) \cdot hm^{-2}$, 高于小麦基肥期的 55~94 $\mu g(N) \cdot hm^{-2}$, 说明当前施肥方式下追肥期是砂姜黑土 N_2O 的高排时期; 对比小麦玉米两季 N_2O 排放峰值, 结果发现小麦季的 N_2O 排放峰值高于玉米季 (图 4), 说明小麦季是砂姜黑土小麦玉米轮作体系的高排期; 对比不同施肥处理的排放峰值, 发现 TR 处理 5 次施肥的峰值均高于其他处理, 其最高峰值达 193 $\mu g(N) \cdot hm^{-2}$, 显著高于其他处理, 其次为 OPT 处理, ZOPT 处理的峰值相对降低。

2.3 砂姜黑土小麦-玉米轮作体系 N_2O 累积排放量

通过对小麦季和玉米季 N_2O 平均排放通量和累积排放量的估算 (表 2), 发现施氮处理玉米季的 N_2O 平均排放通量为 14.42~24.45 $\mu g(N) \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$, 而小麦季 N_2O 平均排放通量为 14.17~21.55 $\mu g(N) \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$, 玉米季略高于小麦季。与 N_2O 平均排放通量不同, 小麦季 N_2O 的累积量为 0.82~1.24 $kg(N) \cdot hm^{-2}$, 而玉米季 N_2O 的累积量为 0.42~0.71 $kg(N) \cdot hm^{-2}$, 小麦季显著高于玉米季 ($P<0.05$), 进一步说明小麦季是砂姜黑土小麦-玉米轮作体系的主要排放期。综合小麦-玉米轮作体系 N_2O 排放通量, 结果发现不同施氮处理的 N_2O 平均排放通量为 14.30~19.56 $\mu g(N) \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$, 累积排放量为 1.23~1.96 $kg(N) \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$。对比不同施氮

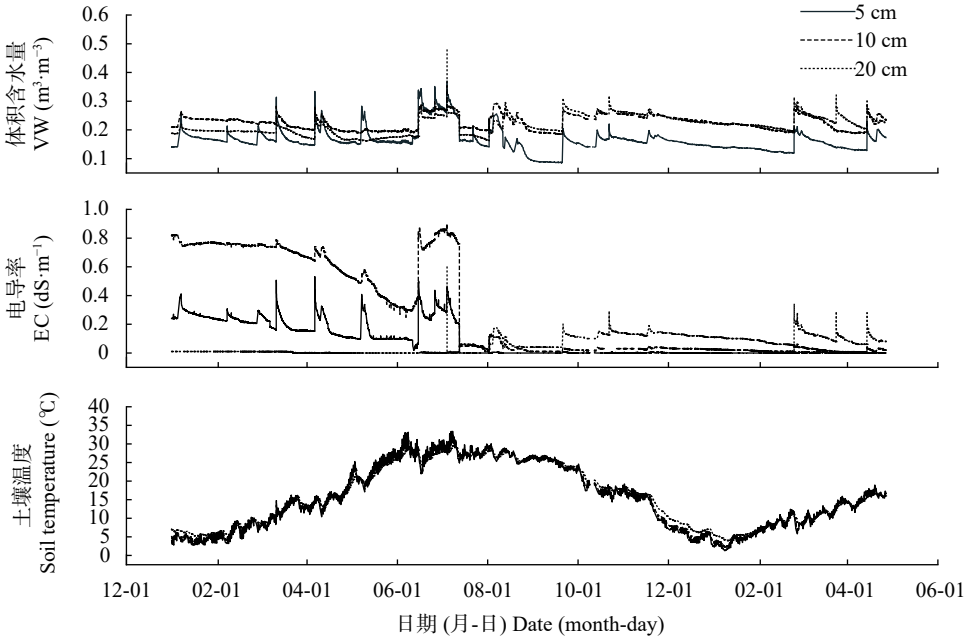

图 3 砂姜黑土小麦-玉米轮作试验期耕层不同深度土壤容积含水量、电导率和温度的变化

Fig. 3 Soil moisture content (VW), electrical conductivity (EC) and temperature in different depthes of plough layer of lime concretion black soil during the experiment period

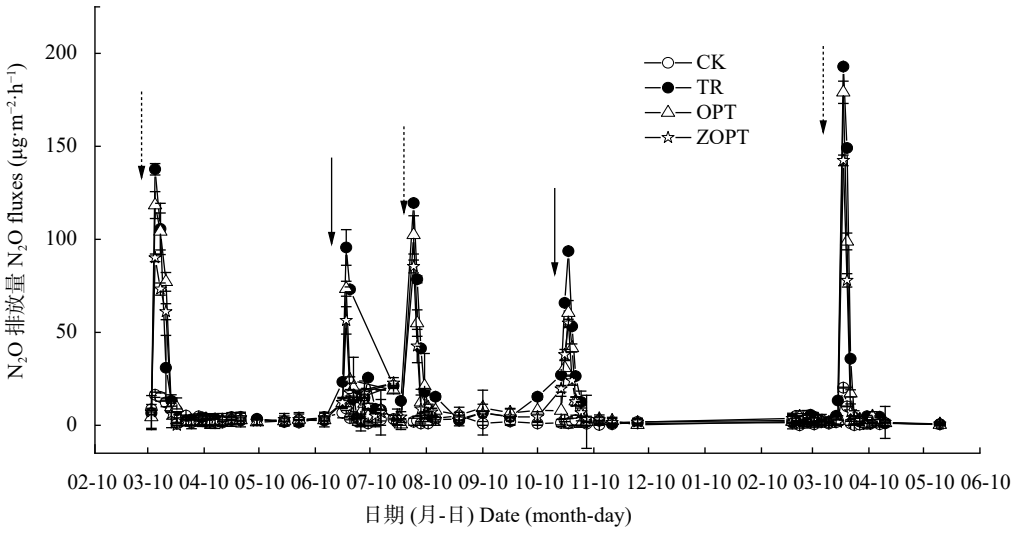

图 4　小麦-玉米轮作农田不同施肥处理下典型施肥期的 N_2O 挥发速率

Fig. 4　N_2O fluxes in the typical fertilization periods of different fertilization treatments of wheat and corn rotation field

CK、TR、OPT 和 ZOPT 处理施肥情况如表 1 所示。Fertilization of CK, TR, OPT and ZOPT treatments are shown in Table 1.

表 2　砂姜黑土小麦-玉米轮作的 N_2O 平均排放通量及累积排放量

Table 2　Average fluxes and cumulative emissions of N_2O in wheat and corn rotation system under different fertilization treatments

处理 Treatment	小麦季 Wheat season		玉米季 Corn season		小麦-玉米轮作体系 Rotation system	
	N_2O平均通量 Average N_2O flux [μg(N)·m^{-2}·h^{-1}]	N_2O累积排放量 Cumulative N_2O emission [kg(N)·hm^{-2}]	N_2O平均通量 Average N_2O flux [μg(N)·m^{-2}·h^{-1}]	N_2O累积排放量 Cumulative N_2O emission [kg(N)·hm^{-2}]	N_2O平均通量 Average N_2O flux [μg(N)·m^{-2}·h^{-1}]	N_2O累积排放量 Cumulative N_2O emission [kg(N)·hm^{-2}·a^{-1}]
CK	3.65±0.95d	0.21±0.20d	3.34±0.52d	0.11±0.02c	3.50±0.74d	0.31±0.22d
TR	21.55±4.12a	1.24±0.41a	24.45±5.27a	0.71±0.27a	19.56±4.70a	1.96±0.68a
OPT	17.13±3.28b	0.99±0.33b	17.57±3.86b	0.51±0.24b	17.35±3.57b	1.49±0.57b
ZOPT	14.17±3.11c	0.82±0.26c	14.42±4.11c	0.42±0.28b	14.30±3.61c	1.23±0.54c

CK、TR、OPT和ZOPT处理施肥情况如表1所示。同列不同字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。Fertilization of CK, TR, OPT and ZOPT treatments are shown in Table 1. Different letters in the same column mean significant differences among treatments at P<0.05 level.

处理的 N_2O 平均排放通量和累积排放量, 结果发现不同处理差异显著 (P<0.05), 无论小麦季还是玉米季, TR 处理的 N_2O 平均排放均显著高于其他处理 (P<0.05), 而 ZOPT 处理的数值最低 (除 CK 外)。

2.4　土壤矿质氮动态变化特征以及关键因素与 N_2O 排放的响应关系

土壤铵态氮与硝态氮 (Nmin) 是决定农田土壤 N_2O 排放的最关键因素, 采集气体同时采集土壤样品, 并分析 Nmin。结果发现, Nmin 峰值均出现在施肥后的 3 周内, 与不同时期的 N_2O 峰值相吻合 (图 5); 建立 Nmin、不同层土壤温度、土壤含水量与 N_2O 排放的多元线性相关关系 (表 3), 结果发现所有处理土壤铵态氮含量与 N_2O 排放无明显的相关关系, 其 R^2 为 0.033~0.278; 而硝态氮含量与 N_2O 排放均呈显著或极显著相关性, 其中 CK 处理显示显著相关性 (P<0.05), 玉米季和小麦季 R^2 分别为 0.421 和 0.373; 其余处理两季均表现极显著相关 (P<0.01), R^2 为 0.652~0.903。对比不同土层温度与 N_2O 的相关性, 结果发现 CK 处理 N_2O 排放与玉米季的 5 cm 和 10 cm 土壤温度 ($T_{5\ cm}$ 和 $T_{10\ cm}$) 和小麦季的 20 cm 土壤温度 ($T_{20\ cm}$) 均表现显著正相关 (P<0.05), 而与其他处理未表现出明显的多元线性相关。与土壤温度结果类似, CK 处理 N_2O 排放与玉米季的 5~10 cm 土壤体积含水量 ($V_{10\ cm}$)、小麦季的 0~5 cm 和 5~10 cm 土壤体积含水量 ($V_{5\ cm}$ 和 $V_{10\ cm}$) 均表现显著的相关性 (P<0.05) (表 3), 由此说明不施肥条件下土壤温度、土壤含水量和土壤硝酸盐含量均是影响 N_2O 排放的重要因素; 而施肥条件下, 土壤硝酸盐是影响砂姜黑土 N_2O 排放的关键影响因素。

2.5　小麦玉米轮作体系作物产量、氮肥利用率及 N_2O 排放系数

不同施肥处理作物产量和氮肥利用率如表 4 所示。除 CK 处理外, TR、OPT 和 ZOPT 处理玉米季产量无明显差异。与玉米季不同, 小麦季 ZOPT 处理的产量显著低于 OPT 处理, 而 TR 和 OPT 处理的产量无明显差异, 说明传统施氮量可能存在过量问题。

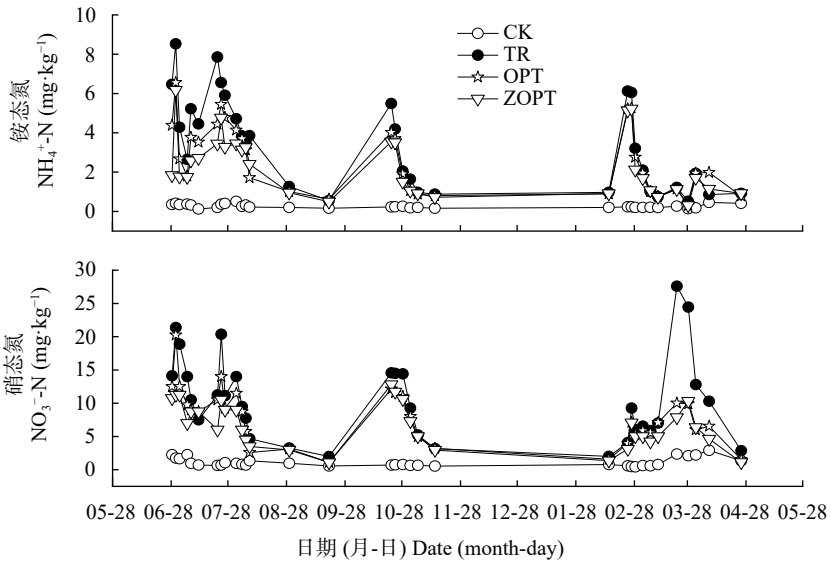

图 5 砂姜黑土小麦季和玉米季不同施肥处理耕层土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量动态变化

Fig. 5 Dynamic of soil NH_4^+-N and NO_3^--N contents of plough layer under different fertilization treatments in wheat and corn seasons of lime concretion black soil

CK、TR、OPT 和 ZOPT 处理施肥情况如表 1 所示。Fertilization of CK, TR, OPT and ZOPT treatments are shown in Table 1.

表 3 砂姜黑土小麦季和玉米季不同施肥处理 N_2O 排放与土壤环境因子相关性分析

Table 3 Correlation analysis of N_2O flux from different treatments and soil environmental factors under different fertilization treatments in wheat and maize seasons of lime concretion black soil

时期 Stage	处理 Treatment	NH_4^+-N	NO_3^--N	$T_{5\,cm}$	$T_{10\,cm}$	$T_{20\,cm}$	$V_{5\,cm}$	$V_{10\,cm}$	$V_{20\,cm}$
		mg·kg^{-1}		℃			m^3·m^{-3}		
玉米季 Corn season	CK	0.177	0.421*	0.421*	0.402*	0.321	0.210	0.380*	0.287
	TR	0.163	0.665**	0.046	0.039	0.028	0.120	0.240	0.214
	OPT	0.278	0.652**	0.069	0.058	0.024	0.103	0.134	0.220
	ZOPT	0.183	0.783**	0.152	0.168	0.111	0.187	0.156	0.238
小麦季 Wheat season	CK	0.033	0.373*	0.131	0.055	0.372*	0.407*	0.337*	0.022
	TR	0.119	0.903**	0.063	0.155	0.041	0.154	0.185	0.307*
	OPT	0.155	0.799**	0.042	0.107	0.052	0.151	0.200	0.254
	ZOPT	0.171	0.831**	0.029	0.125	0.052	0.164	0.257	0.350*

CK、TR、OPT和ZOPT处理施肥情况如表1所示。$T_{5\,cm}$、$T_{10\,cm}$和$T_{20\,cm}$分别表示5 cm、10 cm、20 cm的土壤温度, $V_{5\,cm}$、$V_{10\,cm}$和$V_{20\,cm}$分别表示0~5 cm、5~10 cm和10~20 cm土层的体积含水量。*表示P<0.05水平显著相关; **表示在P<0.01水平显著相关。Fertilization of CK, TR, OPT and ZOPT treatments are shown in Table 1. $T_{5\,cm}$, $T_{10\,cm}$ and $T_{20\,cm}$ are soil temperature at 5 cm, 10 cm and 20 cm depths. $V_{5\,cm}$, $V_{10\,cm}$ and $V_{20\,cm}$ are volumetric water contents at 0−5 cm, 5−10 cm and 10−20 cm soil layers. * indicates significant correlation at P<0.05 level; ** indicates significant correlation at P<0.01 level.

对比不同处理的地上吸氮量, 结果发现玉米季 TR、OPT 和 ZOPT 处理无明显差异, 而小麦季 OPT 处理的吸氮量甚至高于 TR 处理, TR 和 ZOPT 处理无明显差异, 说明合适的施氮量才能更有效地促进砂姜黑土作物氮素的有效积累, 过高或者过低施氮反而降低作物的氮素利用。优化施氮可以显著提高作物氮肥利用率, 尤其 ZOPT 处理玉米和小麦季的氮肥利用率分别达 47.8% 和 51.0%, 其次为 OPT 处理, TR 处理两季氮肥利用率最低。除此之外, 不同施肥处理的 N_2O 排放量显著不同 (P<0.05), 导致不同施肥处理的排放系数也存在明显差异 (P<0.05)。TR 处理玉米和小麦两季的 N_2O 排放系数分别为 0.28% 和 0.50%, 显著高于 OPT 和 ZOPT 处理 (P<0.05), 而 OPT 和 ZOPT 处理无明显差异。

3 讨论

3.1 影响砂姜黑土区小麦玉米轮作体系 N_2O 排放的关键因素

小麦-玉米轮作体系的 N_2O 排放已有大量研究工作, 但由于施肥方式、施肥量、气候条件、土壤条件等因素的影响, 不同区域小麦-玉米轮作体系的 N_2O 排放量存在较大差异。例如肖乾颖等[19] 研究发现, 紫色土传统施肥方式下小麦-玉米轮作体系的 N_2O 的排放分别为 0.42 kg(N)·hm^{-2} 和 0.53 kg(N)·hm^{-2}, 排放系数分别为 0.22% 和 0.28%; 高建民[20] 研究发现, 黄土高原麦田施氮量 240 kg·hm^{-2} 条件下 N_2O 的

表 4　砂姜黑土小麦和玉米不同施肥处理的产量、氮肥利用率及 N_2O 排放系数

Table 4　Crop yields, nitrogen fertilizer utilization rates and N_2O emission factors of different fertilization treatments in wheat and corn seasons of lime concretion black soil

作物 Crop	处理 Treatment	施氮量 N fertilizer rate ($kg \cdot hm^{-2}$)	籽粒产量 Yield ($t \cdot hm^{-2}$)	地上吸氮量 N uptake of aboveground part ($kg \cdot hm^{-2}$)	氮肥利用率 Nitrogen use efficiency (%)	N_2O挥发量 N_2O emission ($kg \cdot hm^{-2}$)	N_2O排放系数 N_2O emission factor (%)
玉米 Corn	CK	0	3.39±0.18b	43.9±2.8b	/	0.11±0.02c	/
	TR	250	7.79±0.23a	136.1±6.5a	36.9±4.3c	0.71±0.27a	0.28± 0.03a
	OPT	220	7.82±0.21a	136.5±5.9a	42.1±.2.9b	0.51±0.24b	0.23±0.03b
	ZOPT	190	7.73±0.26a	134.7±5.3a	47.8±3.2a	0.42±0.28b	0.22±0.04b
小麦 Wheat	CK	0	3.45±0.14c	70.0±3.1c	/	0.21±0.20d	/
	TR	250	8.06±0.10ab	167.2±4.9b	39.0±5.1c	1.24±0.41a	0.50±0.05a
	OPT	220	8.11±0.13a	170.3±5.7a	45.6±3.7b	0.99±0.33b	0.45±0.03b
	ZOPT	190	7.95±0.11b	166.9±3.9b	51.0±5.5a	0.82±0.26c	0.43±0.06b

CK、TR、OPT和ZOPT处理施肥情况如表1所示。氮肥利用率=(施氮处理地上吸氮量–CK地上吸氮量)/施氮量×100%。同列不同字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。Fertilization of CK, TR, OPT and ZOPT treatments are shown in Table 1. Nitrogen use efficiency (NUE) = (aboveground N uptake in fertilization treatments – that in CK treatment) / N application rate ×100%. Different letters in the same column mean significant differences among treatments at P<0.05 level.

排放量为 1.41~1.67 $kg(N) \cdot hm^{-2}$, 排放系数为 0.47%~0.56%; 而张秀玲等[21] 对潮土农田 N_2O 监测发现, 玉米季在施氮量 240 $kg \cdot hm^{-2}$ 条件下 N_2O 排放量达 2.28 $kg(N) \cdot hm^{-2}$, 排放系数达 0.89%; Lü等[10,22] 研究发现, 灰漠土小麦季和玉米季的 N_2O 排放量分别为 1.3 $kg(N) \cdot hm^{-2}$ 和 1.3 $kg(N) \cdot hm^{-2}$, 排放系数为 0.5% 和 0.5%。由此可见, 不同土壤类型条件下, 受制于多种因素影响, 小麦-玉米轮作体系的 N_2O 排放量存在较大差异[20,23-25]。砂姜黑土农田 N_2O 排放前期研究工作较少, 鲜见 N_2O 排放特征及排放系数相关报道, 而我们的研究显示砂姜黑土小麦季不同施氮量条件下 N_2O 排放量为 0.82~1.24 $kg(N) \cdot hm^{-2}$, 排放系数为 0.43%~0.50%; 而玉米季 N_2O 排放量为 0.42~0.71 $kg(N) \cdot hm^{-2}$, 排放系数为 0.22%~0.28%, 小麦季 N_2O 排放量显著高于玉米季, 小麦季是砂姜黑土 N_2O 的高排期, 究其原因可能与小麦季生长周期长和氮素的其他损失途径低有关[26]。除此之外, 与其他土壤类型相比, 砂姜黑土 N_2O 排放量高于紫色土, 与黄土 (土垫旱耕人为土) 的排放量差异不大, 但显著低于潮土的排放量[21]。相关研究发现, 质地黏重土壤的阳离子交换量大, NH_4^+-N 易被吸附固定而不易进行硝化作用[27-28], 杨云等[29] 也证实 N_2O 的季节性排放总量与土壤黏粒含量呈明显负相关, 与土壤沙粒含量呈明显正相关。而砂姜黑土由河湖沉积物以及近代河流沉积物等母质发育而来, 黏粒含量较高, 一般可达 30% 以上, 属于典型的高黏性土壤[15,30], 从土壤质地来看砂姜黑土农田土壤并非 N_2O 高排土壤。除此之外, 砂姜黑土湿黏闭, 导致灌溉后土壤通透性差, 土壤氧气含量较低, 这有可能利于反硝化反应的发生。由于未开展 NO 和 N_2 两种气体排放试验, 同时对于小麦玉米季的土壤硝化与反硝化微生物活性方面尚处于初步研究阶段, 本文未阐述 N_2O 的排放与硝化与反硝化微生物的相关性问题。未来将进一步聚焦砂姜黑土 NOy 的产生途径及微生物学机制。

3.2　砂姜黑土 N_2O 排放量测定数据的不确定性分析

本研究采用静态箱-气相色谱法开展 N_2O 气体排放的监测。为了获取高浓度 N_2O 气体, 试验采用高度为 30 cm 静态箱进行气体采集。由于高度的限制, 箱体只能覆盖小麦和玉米苗期, 后期采取移除植株确保连续采样, 是否这会对土壤 N_2O 排放产生影响, 目前还缺乏相关研究。本研究在幼苗移除后, 发现不同处理 N_2O 排放都有不同程度的升高, 但周期很短, 这可能与植株的移除, 采样区土壤松动利于气体流通和土壤中的氮素不能被植物吸收, 更多的氮素无法参与到植物循环中去, 被土壤固定或被硝化与反硝化微生物利用有关。尽管短期有上升, 但是否对整个生长季 N_2O 排放产生影响还不得而知, 未来仍需进一步研究。砂姜黑土尽管有砂姜层存在, 但砂姜层分布的深浅差异很大, 例如河南南阳等地的砂姜黑土砂姜层在耕层以下 10~20 cm, 而驻马店等地的砂姜层可能在 80 cm 以下[30], 本研究的砂姜黑土砂姜层较深, 氮素在下移过程中受砂姜层的影响较小, 利于氮素向深层迁移 (尤其长期施肥条件下), 可能会影响不同土层 N_2O 的积累与排放。小麦玉米季 N_2O 排放的差异性也存在一定的不确定性, 例如唐占明等[31] 发现华北平原小麦-玉米轮作体系玉米季 N_2O 排放量高于小麦季, 许宏伟等[32] 在西北塿土小麦-玉米轮作体系上发现类似问题, 而肖乾颖等[19] 发现紫色土单施化肥条件下小麦季与玉米季 N_2O 排放量相仿。本研究结果显示, 小麦季的 N_2O 排放量显

著高于玉米季, 小麦季排放量占小麦-玉米轮作体系总排放量的 64%~66%, 成为砂姜黑土小麦-玉米轮作体系的高排放季。小麦季排放量高的原因可能归结于 3 方面: 1) 玉米季的生长周期较短, 而小麦季的生长周期较长, 周期的长短可能影响 N_2O 的累积排放量; 2) 两季施肥方式不同, 玉米季为种肥同播, 而小麦季为撒施后旋耕, 从某种程度上来说, 旋耕条件下土壤扰动更明显, 通透性较好, 更有利于氮素的硝化反应[33]; 3) 小麦追肥期在 2 月底到 3 月初, 此时温度为 10~20 ℃, 而玉米季追肥在 7 月中, 此时温度多为 30~40 ℃, 相关研究显示, 硝化与反硝化微生物的最佳活性为 10~30 ℃, 而高于 30 ℃ 反而导致硝化与反硝化微生物活性的降低, 进一步影响 N_2O 的排放[27-28]。除此之外, 吕金岭等[12] 发现砂姜黑土玉米季的氨挥发量显著高于小麦季, 间接导致转化为 N_2O 的氮素量减少。同时, 本研究还发现不同施氮量与 N_2O 排放呈显著的指数增长关系, 这可能由于作物无法吸收过多的氮素, 从而为硝化与反硝化微生物生长提供充足的养分和反应底物, 导致 N_2O 释放量的增加, 进一步说明传统施肥方式导致 N_2O 激发性排放不可忽视 (图 6)。总而言之, 施肥方式和施肥量是影响砂姜黑土农田土壤 N_2O 排放的关键因素, 但温度、降雨和风速等从某种程度上也可促进或者降低 N_2O 的排放量及速率[34], 导致 N_2O 累积排放量存在一定的不确定性。因此, 未来应聚焦不同影响因素相互耦合的气体排放模型模拟研究。

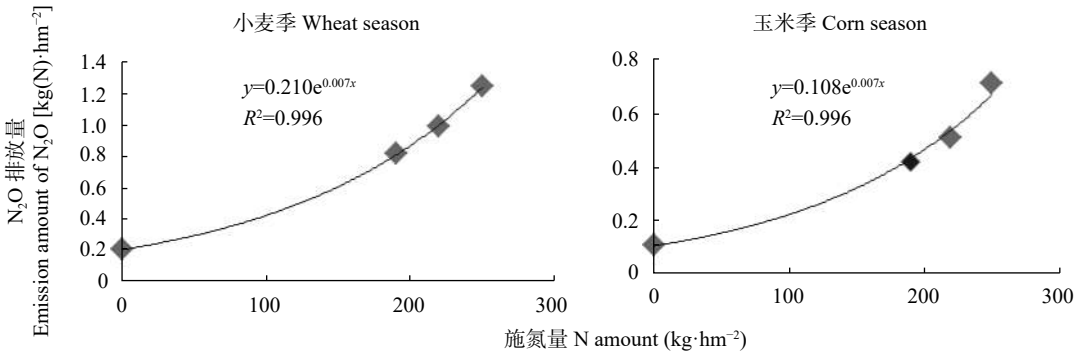

图 6 砂姜黑土施肥量与小麦季和玉米季 N_2O 排放量的响应关系

Fig. 6 Correlation between cumulative N_2O emission and N fertilizer rate in wheat and corn seasons in lime concretion black soil

4 结论

砂姜黑土玉米-小麦轮作农田小麦季 N_2O 排放量为 0.82~1.24 kg(N)·hm^{-2}, 玉米季 N_2O 排放量为 0.42~0.71 kg(N)·hm^{-2}, 小麦季的 N_2O 累积排放量显著高于玉米季, 说明小麦季是砂姜黑土小麦-玉米轮作体系 N_2O 的高排放时期。小麦和玉米季不同施氮时期 N_2O 的排放量差异较大, 小麦季追肥期 N_2O 排放量显著高于基肥期, 而玉米季追肥期的 N_2O 排放量略高于基肥期。与其他土壤类型研究结果类似, 砂姜黑土不同施氮处理的 N_2O 排放量存在较大差别, TR 处理 N_2O 排放量均显著高于其他处理, 其次为 OPT 处理, 再次为 ZOPT 和 CK 处理。对比两季作物产量, 结果发现, TR、OPT 和 ZOPT 处理玉米季的产量整体差异不大, 而小麦季 TR 和 OPT 产量高于 ZOPT 处理, 由此说明砂姜黑土小麦玉米合适的施氮量为 220 kg·hm^{-2}。整体而言, 砂姜黑土小麦季 N_2O 的排放系数为 0.43%~0.50%, 玉米季的排放系数为 0.22%~0.28%。与其他土壤类型相比, 砂姜黑土不属于 N_2O 高排放土壤, 但传统的施氮量导致的 N_2O 排放量仍不可忽视, 因此合理施肥和新型肥料推广使用仍需要被重视。

参考文献 References

[1] IPCC, STOCKER T F, QIN D, et al. The physical science basis. contribution of working group Ⅰ to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[EB/OL]. Working Group Ⅰ to the Fifth Assess. 2013. https://www.oalib.com/references/14767623

[2] 李长生, 肖向明, FROLKING S, 等. 中国农田的温室气体排放[J]. 第四纪研究, 2003, 23(5): 493−503
LI C S, XIAO X M, FROLKING S, et al. Greenhouse gas emissions from croplands of China[J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(5): 493−503

[3] DING T, NING Y D, ZHANG Y. Estimation of greenhouse gas emissions in China 1990−2013[J]. Greenhouse Gases: Science and Technology, 2017, 7(6): 1097−1115

[4] ZHANG W F, DOU Z X, HE P, et al. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(21): 8375−8380

[5] 巨晓棠, 谷保静. 氮素管理的指标[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 281−296
JU X T, GU B J. Indexes of nitrogen management[J]. Acta

Pedologica Sinica, 2017, 54(2): 281−296

[6] 蔡祖聪, 颜晓元, 朱兆良. 立足于解决高投入条件下的氮污染问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1): 1−6
CAI Z C, YAN X Y, ZHU Z L. A great challenge to solve nitrogen pollution from intensive agriculture[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(1): 1−6

[7] 胡慧娴, 袁丹, 曾佳瑞, 等. 植物排放N_2O研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(2): 345−354
HU H X, YUAN D, ZENG J R, et al. Advances in plant nitrous oxide (N_2O) emissions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(2): 345−354

[8] LEE A, WINTHER M, PRIEMÉ A, et al. Hot spots of N_2O emission move with the seasonally mobile oxic-anoxic interface in drained organic soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 115: 178−186

[9] 胡春胜, 张玉铭, 秦树平, 等. 华北平原农田生态系统氮素过程及其环境效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1501−1514
HU C S, ZHANG Y M, QIN S P, et al. Nitrogen processes and related environmental effects on agro-ecosystem in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(10): 1501−1514

[10] LYU J, LIU X J, LIU H, et al. Greenhouse gas intensity and net annual global warming potential of cotton cropping systems in an extremely arid region[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2014, 98(1): 15−26

[11] 熊丽萍, 吴家梅, 纪雄辉, 等. 水旱轮作系统中土壤CH_4和N_2O排放研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 863−871
XIONG L P, WU J M, JI X H, et al. A review on soil CH_4 and N_2O emissions from paddy-upland rotation systems[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(4): 863−871

[12] 吕金岭, 王小非, 李太魁, 等. 不同施肥方式下砂姜黑土冬小麦-夏玉米轮作农田氨挥发特征及排放系数[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(12): 1869−1879
LYU J L, WANG X F, LI T K, et al. Ammonia emission characteristics and emission coefficients of wheat and corn rotation cropland under different fertilization methods in lime concretion black soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(12): 1869−1879

[13] 李欠欠. 脲酶抑制剂LIMUS对我国农田氨减排及作物产量和氮素利用的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2014
LI Q Q. Effect of urease inhibitor LIMUS on ammonia mitigation and crop yield and nitrogen use efficiency in different croplands of China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014

[14] 姜超强, 卢殿君, 祖朝龙, 等. 施用方式和氮肥种类对砂姜黑土氮素迁移的影响[J]. 土壤, 2018, 50(2): 248−255
JIANG C Q, LU D J, ZU C L, et al. Effects of different fertilization methods and nitrogen fertilizers on nitrogen diffusion and migration in lime concretion black soil[J]. Soils, 2018, 50(2): 248−255

[15] 王玥凯, 郭自春, 张中彬, 等. 不同耕作方式对砂姜黑土物理性质和玉米生长的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(6): 1370−1380
WANG Y K, GUO Z C, ZHANG Z B, et al. Effect of tillage practices on soil physical properties and maize growth in Shajiang black soil (vertisol)[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(6): 1370−1380

[16] 高学振, 张丛志, 张佳宝, 等. 生物炭、秸秆和有机肥对砂姜黑土改性效果的对比研究[J]. 土壤, 2016, 48(3): 468−474
GAO X Z, ZHANG C Z, ZHANG J B, et al. Comparison of biochar, straw and manure in improving Shajiang black soil[J]. Soils, 2016, 48(3): 468−474

[17] 丁洪, 蔡贵信, 王跃思, 等. 华北平原几种主要类型土壤的硝化及反硝化活性[J]. 农业环境保护, 2001, 20(6): 390−393
DING H, CAI G X, WANG Y S, et al. Nitrification and denitrification potential in different types of soils in the North China Plain[J]. Agro-Environmental Protection, 2001, 20(6): 390−393

[18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
BAO S D. Soil Agrochemical Analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000

[19] 肖乾颖, 黄有胜, 胡廷旭, 等. 施肥方式对紫色土农田生态系统N_2O和NO排放的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(2): 203−213
XIAO Q Y, HUANG Y S, HU T X, et al. Effects of fertilization regimes on N_2O and NO emissions from agro-ecosystem of purplish soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(2): 203−213

[20] 高建民. 水氮供应对小麦—玉米轮作农田N_2O排放的影响及其机理研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2017
GAO J M. N_2O emission from the agricultural soil under the supply of nitrogen and water in wheat-maize rotation system[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2017

[21] 张秀玲, 孙赟, 张水清, 等. 生物质炭对华北平原4种典型土壤N_2O排放的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(11): 5173−5181
ZHANG X L, SUN Y, ZHANG S Q, et al. Effects of biochar on N_2O emission from four typical soils in the North China Plain[J]. Environmental Science, 2019, 40(11): 5173−5181

[22] LYU J, YIN X H, DORICH C, et al. Net field global warming potential and greenhouse gas intensity in typical arid cropping systems of China: a 3-year field measurement from long-term fertilizer experiments[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 212: 105053

[23] DING W X, CAI Y, CAI Z C, et al. Nitrous oxide emissions from an intensively cultivated maize-wheat rotation soil in the North China Plain[J]. Science of the Total Environment, 2007, 373(2/3): 501−511

[24] 陈静, 王迎春, 李虎, 等. 基于DNDC模型的冬小麦-夏玉米农田滴灌施肥优化措施研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(2): 200−212
CHEN J, WANG Y C, LI H, et al. Optimization of drip fertilization practice for winter wheat-summer maize farmland using the DNDC model[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(2): 200−212

[25] 邹凤亮, 曹凑贵, 马建勇, 等. 基于DNDC模型模拟江汉平原稻田不同种植模式条件下温室气体排放[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(9): 1291−1301
ZOU F L, CAO C G, MA J Y, et al. Greenhouse gases emission

under different cropping systems in the Jianghan Plain based on DNDC model[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(9): 1291−1301

[26] 吕金岭, 王小非, 寇长林. 两种方法测定砂姜黑土玉米季农田氨挥发[J]. 磷肥与复肥, 2020, 35(11): 45−49
LYU J L, WANG X F, KOU C L. Two methods for determination of ammonia volatilization in corn field of lime concretion black soil[J]. Phosphate& Compound Fertilizer, 2020, 35(11): 45−49

[27] 曹文超, 宋贺, 王娅静, 等. 农田土壤N_2O排放的关键过程及影响因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(10): 1781−1798
CAO W C, SONG H, WANG Y J, et al. Key production processes and influencing factors of nitrous oxide emissions from agricultural soils[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(10): 1781−1798

[28] 曾江海, 王智平. 农田土壤N_2O生成与排放研究[J]. 土壤通报, 1995, 26(3): 132−134
ZENG J H, WANG Z P. Study on N_2O generation and emission from farmland soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1995, 26(3): 132−134

[29] 杨云, 黄耀, 姜纪峰. 土壤理化特性对冬季菜地N_2O排放的影响[J]. 农村生态环境, 2005, 21(2): 7−12
YANG Y, HUANG Y, JIANG J F. Influence of soil properties on N_2O emission from vegetable soils in winter[J]. Rural Eco-Environment, 2005, 21(2): 7−12

[30] 赵燕. 河南省砂姜黑土系统分类归属及代表土系的建立[D]. 郑州: 郑州大学, 2012
ZHAO Y. Calcic black soils classified in Chinese soil taxonomy and the soil series established in Henan Province[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2012

[31] 唐占明, 刘杏认, 张晴雯, 等. 对比研究生物炭和秸秆对麦玉轮作系统N_2O排放的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(3): 1569−1580
TANG Z M, LIU X R, ZHANG Q W, et al. Effects of biochar and straw on soil N_2O emission from a wheat-maize rotation system[J]. Environmental Science, 2021, 42(3): 1569−1580

[32] 许宏伟, 李娜, 冯永忠, 等. 氮肥和秸秆还田方式对麦玉轮作土壤N_2O排放的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(12): 5668−5676
XU H W, LI N, FENG Y Z, et al. Effects of nitrogen fertilizer and straw returning methods on N_2O emissions in wheat-maize rotational soils[J]. Environmental Science, 2020, 41(12): 5668−5676

[33] SKIBA U S, VAN S D, BALL B C. The influence of tillage on NO and N_2O fluxes under spring and winter barley[J]. Soil Use and Management, 2002, 18(4): 340−345

[34] LUDWIG B, BERGSTERMANN A, PRIESACK E, et al. Modelling of crop yields and N_2O emissions from silty arable soils with differing tillage in two long-term experiments[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 112(2): 114−121