

DOI: 10.11766/trxb202106220322

张楠, 苗淑杰, 乔云发, 陈增明, 丁维新. 东北农田黑土 N<sub>2</sub>O 排放研究进展[J]. 土壤学报, 2022, 59 (4): 899–909.

ZHANG Nan, MIAO Shujie, QIAO Yunfa, CHEN Zengming, DING Weixin. N<sub>2</sub>O Emissions from Black Soils in Northeast China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (4): 899–909.

## 东北农田黑土 N<sub>2</sub>O 排放研究进展\*

张楠<sup>1, 2</sup>, 苗淑杰<sup>1†</sup>, 乔云发<sup>1</sup>, 陈增明<sup>2†</sup>, 丁维新<sup>2</sup>

(1. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044; 2. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

**摘要:** 农田是温室气体氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)的重要排放源, 位于东北地区的黑土地是我国重要的粮食生产基地。目前我国农田 N<sub>2</sub>O 排放增速正在放缓, 但是东北黑土区仍在加快。针对我国东北黑土区的自身特点和 N<sub>2</sub>O 排放研究现状, 本文综合分析了黑土 N<sub>2</sub>O 排放特征、产生过程与影响因素。结果表明, 东北农田黑土 N<sub>2</sub>O-N 背景排放量平均为 0.56±0.29 kg·hm<sup>-2</sup>, 施用化肥黑土 N<sub>2</sub>O-N 平均排放量为 1.49±1.09 kg·hm<sup>-2</sup>, 化肥氮诱导的 N<sub>2</sub>O 排放系数(EF)为 0.45%±0.42%。与中国旱地和其他黑土区相比, 东北农田黑土的背景排放量和 EF 均处于较低水平。这是因为在正常降雨条件下, 东北黑土 N<sub>2</sub>O 主要是由硝化作用产生, 反硝化作用受到活性碳缺乏的限制。冻融过程则可能促进反硝化作用进行, 诱导春融期 N<sub>2</sub>O 出现爆发式排放。与我国其他农田相比, 东北黑土 N<sub>2</sub>O 排放研究明显不足, 今后应加强对不同区域黑土 N<sub>2</sub>O 排放的原位观测, 阐明冻融过程 N<sub>2</sub>O 的产生机制, 评估黑土 N<sub>2</sub>O 排放对气候变化的响应; 同时应加强研究秸秆还田、有机肥施用等措施对 N<sub>2</sub>O 排放的影响效应, 从而制定出黑土地质量提升和 N<sub>2</sub>O 减排的双赢措施。

**关键词:** 东北; 氮循环; 冻融过程; 黑土; 氧化亚氮; 有机碳

**中图分类号:** S154.2      **文献标志码:** A

## N<sub>2</sub>O Emissions from Black Soils in Northeast China

ZHANG Nan<sup>1, 2</sup>, MIAO Shujie<sup>1†</sup>, QIAO Yunfa<sup>1</sup>, CHEN Zengming<sup>2†</sup>, DING Weixin<sup>2</sup>

(1. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** Cropland is an important source of the potent greenhouse gas nitrous oxide(N<sub>2</sub>O). The cultivated black soils located in Northeast China play a vital role in national grain production. It has been demonstrated that the growth rate of N<sub>2</sub>O emissions from Chinese croplands is slowing down but still accelerating in the black soil area of Northeast China. Aiming at comprehensively assessing N<sub>2</sub>O emissions and understanding the production mechanisms, in this study, we summarized and characterized the N<sub>2</sub>O emission intensity, production processes and influencing factors from the black soils in Northeast China. The results showed that the average N<sub>2</sub>O-N emissions from unfertilized and inorganic-fertilizer applied black soils were 0.56±

\* 国家自然科学基金项目(42077029)、中国科学院国际伙伴计划项目(151432KYSB20200001)和中国科协青年人才托举工程项目(YESS20200124) Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42077029), the International Partnership Program of Chinese Academy of Sciences (No. 151432KYSB20200001), and the Young Elite Scientist Sponsorship Program by CAST (No. YESS20200124)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: sjmiao2015@nuist.edu.cn; zmchen@issas.ac.cn

作者简介: 张楠(1996—), 女, 陕西富平人, 博士研究生, 主要研究领域为黑土氮循环与温室气体排放研究。E-mail: zhangn9658@163.com

收稿日期: 2021-06-22; 收到修改日期: 2021-10-08; 网络首发日期(www.cnki.net): 2022-01-07

0.29 and  $1.49 \pm 1.09 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , respectively. The inorganic fertilizer-N induced  $\text{N}_2\text{O}$  emission factor(EF) was  $0.45\% \pm 0.42\%$  on average across the black soils in Northeast China. Both the background emissions and the EF values were generally lower compared with those of other uplands in China and black soils in other countries. This was likely due to the limitation of denitrification by labile carbon under normal rainfall conditions, and thus the  $\text{N}_2\text{O}$  emissions were predominately derived from nitrification. It was found that the freeze-thaw cycles could greatly promote denitrification and result in large pulses of  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes during spring thaw, which might dominate the annual emissions. Compared with croplands in other regions of China, studies on the  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from black soils in Northeast China are largely limited. In future research, the *in-situ* observations of  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from black soils in different regions of Northeast China should be strengthened, and the mechanisms involved in freeze-thaw induced  $\text{N}_2\text{O}$  emissions should be clarified. This will facilitate the evaluation of the response of  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from black soils to global climate change. Also, there is a need to strengthen researches on the effects of crop residue returning, manure application, etc. on  $\text{N}_2\text{O}$  emissions, to facilitate the development of win-win strategies for enhancing soil quality and simultaneously reduce  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from black soils.

**Key words:** Northeast China; Nitrogen cycling; Freeze-thaw; Black soil; Nitrous oxide; Soil organic carbon

氧化亚氮 ( $\text{N}_2\text{O}$ ) 是重要的温室气体之一, 在大气中的滞留时间长达 114 年, 百年尺度增温潜势是二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ ) 的 265 倍<sup>[1-2]</sup>。全球  $\text{N}_2\text{O}$ -N 排放量已从工业革命前的  $10 \sim 12 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$  增至目前的  $17 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ , 这主要是由于农业生产造成的<sup>[3]</sup>。据估算, 农田土壤对工业革命以来全球陆地生态系统  $\text{N}_2\text{O}$  排放量增长的贡献率高达 82%<sup>[4]</sup>。在土壤中,  $\text{N}_2\text{O}$  可通过多种生物和非生物过程产生, 主要包括硝化作用、反硝化作用、硝酸盐异化还原成铵等。这些过程受多种因素的影响, 如气象条件、土壤性质、田间管理措施等。在不同土壤和不同尺度下, 控制  $\text{N}_2\text{O}$  产生的因素不同, 因此  $\text{N}_2\text{O}$  的排放表现出较大的时空变异, 极大增加了  $\text{N}_2\text{O}$  排放量估算的不确定性和定量减排的挑战性<sup>[5]</sup>。

位于东北地区的黑土素以肥力高著称, 是我国土壤有机碳 (Soil organic carbon, SOC) 含量最高的旱地土壤类型, 主要分布在黑龙江、吉林、辽宁北部和内蒙古呼伦贝尔地区。黑土区耕地面积占全国总面积的 1/7, 粮食产量占全国总产量的 1/4, 对我国的粮食安全有举足轻重的作用。但是近几十年, 黑土 SOC 含量不断下降, 土壤肥力显著降低<sup>[6-8]</sup>。为保证作物的持续高产, 高量投入氮肥; 但较高的氮肥施用导致  $\text{N}_2\text{O}$  排放量增加<sup>[4]</sup>。Shang 等<sup>[9]</sup>研究发现, 与 1990—2003 年相比, 2004—2014 年我国农田  $\text{N}_2\text{O}$  排放量的年增速显著下降, 但是黑土主要分布区的黑龙江省则表现为显著增加。Chen 等<sup>[10]</sup>建立了全球尺度黑土  $\text{N}_2\text{O}$  排放数据库, 构建了包含降水

量和氮肥用量的  $\text{N}_2\text{O}$  排放模型, 估算我国东北黑土  $\text{N}_2\text{O}$ -N 排放总量为  $30.0 \text{ Gg} \cdot \text{a}^{-1}$ , 其中化肥诱导的  $\text{N}_2\text{O}$ -N 排放量 (不包括背景排放量) 为  $20.6 \text{ Gg} \cdot \text{a}^{-1}$ 。Yue 等<sup>[11]</sup>基于作物类型估算了我国农田系统化肥诱导的  $\text{N}_2\text{O}$ -N 排放总量为  $194 \text{ Gg} \cdot \text{a}^{-1}$ , 其中东北地区的排放量为  $21.5 \text{ Gg} \cdot \text{a}^{-1}$ , 占全国总量的 11%。考虑到全国农田  $\text{N}_2\text{O}$  排放量增速放缓而东北黑土区仍在加快, 这一比例在今后可能会增加。目前, 以土壤有机质提升为核心目标的黑土保护利用措施正在东北地区大力推广。然而最新研究指出, 土壤固碳对缓解气候变化的效应可能被诱发的  $\text{N}_2\text{O}$  排放抵消<sup>[12]</sup>。因此, 研究黑土  $\text{N}_2\text{O}$  排放与产生机制, 对于在“碳达峰、碳中和”战略要求下制定黑土区合理的固碳培肥措施具有重要指导意义。

本文基于前人的研究结果, 对我国东北黑土  $\text{N}_2\text{O}$  排放特征、产生过程以及影响因素进行综述。收集东北黑土  $\text{N}_2\text{O}$  排放田间原位观测数据, 整合分析区域  $\text{N}_2\text{O}$  排放量和化肥氮诱导的  $\text{N}_2\text{O}$  排放系数 (Emission factor, EF), 从气象条件、土壤性质、田间管理措施等方面探讨东北黑土  $\text{N}_2\text{O}$  排放的关键控制因子, 剖析土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放机制, 为东北黑土农田  $\text{N}_2\text{O}$  排放建模估算和减排措施制定提供理论支撑。

## 1 农田黑土 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量

利用文献数据库 (中国知网和 Web of Science) 搜集筛选出中国东北黑土区  $\text{N}_2\text{O}$  排放的文献, 筛选

标准是: (1) 研究对象为东北黑土农田; (2) 数据来自田间原位试验且观测时间至少包含一个完整的作物生长期; (3) 具有试验时间、地点、土壤性质、田间管理措施等信息; (4) 试验同时设置不施肥对照处理和施化肥处理; (5) N<sub>2</sub>O 测定方法为静态箱-气相色谱法。共计采集到 11 个田间试验研究<sup>[10, 13-22]</sup>, 包括 19 个施用化肥处理和 15 个不施肥处理。

整合分析表明, 不施肥处理的黑土 N<sub>2</sub>O-N 背景排放量变化范围为 0.14~1.32 kg·hm<sup>-2</sup>, 平均值为 0.56 kg·hm<sup>-2</sup> (图 1), 显著低于全球农田 N<sub>2</sub>O-N 背景排放量的平均值 (1.10 kg·hm<sup>-2</sup>)<sup>[23]</sup> 以及中国农田 N<sub>2</sub>O-N 背景排放量的平均水平 (0.93~1.40 kg·hm<sup>-2</sup>)<sup>[24-25]</sup>。施用化肥条件下黑土 N<sub>2</sub>O-N 排放量为 0.20~3.71 kg·hm<sup>-2</sup>, 平均值为 1.49 kg·hm<sup>-2</sup>。化肥诱导的 N<sub>2</sub>O 排放系数 (EF) 为 0.03%~1.49%, 平均值为 0.45%, 与 Yue 等<sup>[11]</sup> 统计得到的东北黑土区玉米种植土壤 N<sub>2</sub>O 的 EF (0.51%) 相当, 但显著低于中国旱地农田 N<sub>2</sub>O-EF (0.60%~0.84%) (表 1)<sup>[26-29]</sup>。与世界上其他黑土相比, 我国东北农田黑土 EF 也较低。Romanovskaya<sup>[30]</sup> 报道俄罗斯黑土 N<sub>2</sub>O 排放系数为 1.26%, Nevison 等<sup>[31]</sup> 发现美国“玉米带”土壤 (主要为黑土) N<sub>2</sub>O 排放系数为 1.70%, Rochette 等<sup>[32]</sup> 报道加拿大黑土 N<sub>2</sub>O 排放系数为 1.07%。因此, 无论是 N<sub>2</sub>O 背景排放量还是肥料氮诱导的 N<sub>2</sub>O-EF, 东北农田黑土均处于较低水平, 若仍采用 IPCC 缺省值

(N<sub>2</sub>O-N 背景排放量为 1.0 kg·hm<sup>-2</sup>, EF 为 1.0%)<sup>[33]</sup> 进行估算, 将极大地高估东北农田黑土 N<sub>2</sub>O 的排放。

对收集的数据进行统计分析发现, 东北农田黑土 N<sub>2</sub>O 排放量与年降水量 ( $R^2 < 0.01$ ,  $P = 0.88$ )、年均气温 ( $R^2 = 0.24$ ,  $P = 0.19$ )、土壤 pH ( $R^2 < 0.01$ ,  $P = 0.98$ ) 均无显著相关关系, 但是与 SOC 含量 (图 2a) 和土壤碳氮比 (C/N) (图 2b) 呈显著负相关, 与土壤容重则存在显著正相关关系 (图 2c)。随着氮肥用量的增加, 黑土 N<sub>2</sub>O 排放量表现为指数增长趋势 (图 2d)。

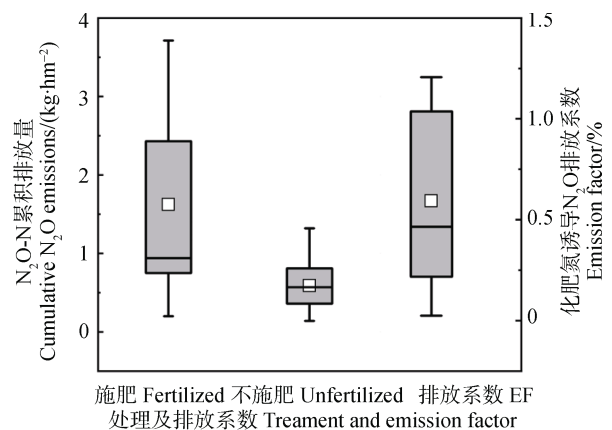


图 1 不施肥和施化肥处理下东北农田黑土 N<sub>2</sub>O 排放量和肥料氮诱导的 N<sub>2</sub>O 排放系数

Fig. 1 N<sub>2</sub>O emissions from cultivated black soils without fertilizers and applied with synthetic fertilizers and synthetic fertilizer induced N<sub>2</sub>O emission factor in Northeast China

表 1 东北农田黑土、中国旱地农田化肥氮诱导 N<sub>2</sub>O 排放系数文献数据整合

Table 1 Integration of literature results of synthetic fertilizer induced N<sub>2</sub>O emission factor from cultivated black soils in Northeast China and Chinese croplands

地区 Region	土地类型 Type	排放系数 Emission factor/%	参考文献 Reference
东北 Northeast China	黑土农田 Cultivated black soils	0.45	本文
		0.51	[11]
中国 China	旱地农田 Upland field soils	0.60	[26]
		0.69	[27]
		0.84	[28]
		0.77	[29]
全球 Global	农田土壤 Cultivated soils	1.00	[33]

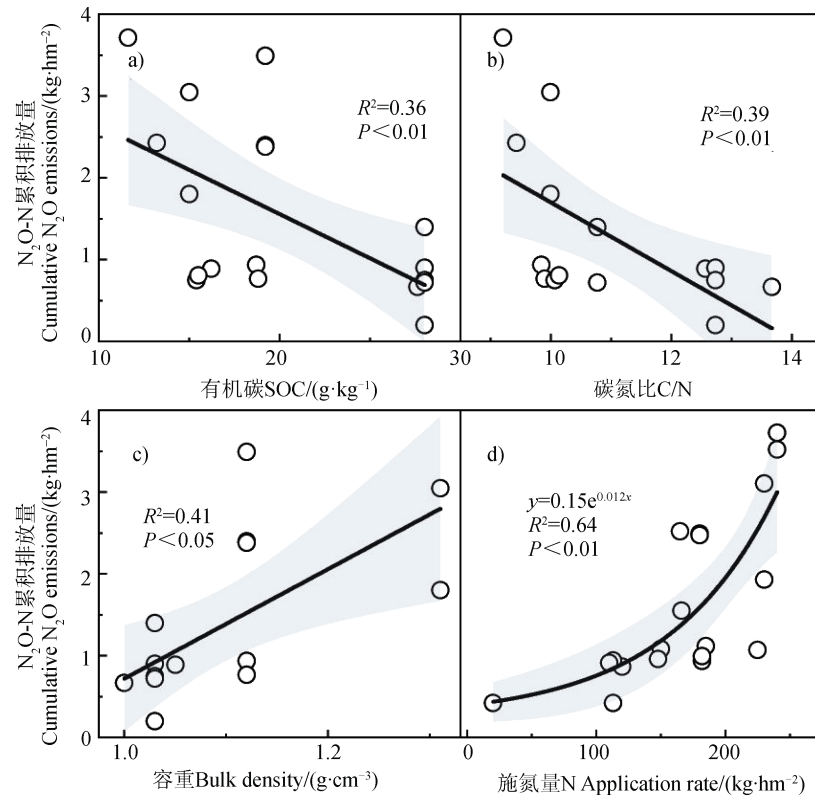


图 2 东北农田黑土  $\text{N}_2\text{O}$  排放量与土壤有机碳含量 (a)、碳氮比 (b)、容重 (c) 和施氮量 (d) 的关系

Fig. 2 Relationships between  $\text{N}_2\text{O}$  emissions and soil organic carbon content (a), C/N ratio (b), bulk density (c) and synthetic fertilizer N application rate (d) from cultivated black soils of Northeast China

## 2 农田黑土 $\text{N}_2\text{O}$ 产生机制

土壤氮素循环的多个过程能够产生  $\text{N}_2\text{O}$ , 包括自养硝化、异养硝化、反硝化、硝化细菌反硝化、同步硝化-反硝化、硝酸盐异化还原成铵 (DNRA) 等。此外, 化学反硝化、共反硝化等非生物学过程也可能是土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的来源 (图 3) [34-35]。

硝化作用发生在好氧区域, 是黑土  $\text{N}_2\text{O}$  产生的主要过程, 可以进一步区分为化能自养型和异养型, 前者是指自养硝化微生物以  $\text{CO}_2$  作为唯一碳源将铵态氮 ( $\text{NH}_4^+$ ) 转化成硝态氮 ( $\text{NO}_3^-$ ) 的过程, 后者是指异养硝化微生物以有机物为碳源将低价态氮氧化成高价态氮的过程。传统观点认为自养硝化是农田土壤的主要硝化过程, 而异养硝化则更多见于草原和森林等自然生态系统 [36-37]。然而, 有研究发现, 黑土中异养硝化对  $\text{N}_2\text{O}$  排放的贡献率可以达到自养硝化的 2 倍; 其原因是, 与其他类型农田土壤相比, 黑土具有较高的 SOC 含量和 C/N 以及较低的 pH 和

容重, 有利于异养硝化作用的进行 [38-39]。与细菌相比, 真菌更能有效地利用难分解有机物、更适应酸性和低氧环境 [40]。而异养硝化的发生多与真菌有关, 特别是 pH 较低的土壤中 [40-41], 因此真菌驱动的异养硝化对黑土  $\text{N}_2\text{O}$  产生的作用可能强于其他农田土壤 [42]。但是, 目前黑土中异养硝化的微生物分子生物学机制尚不清楚, 需要对功能微生物类群及其生化过程开展更深入研究。

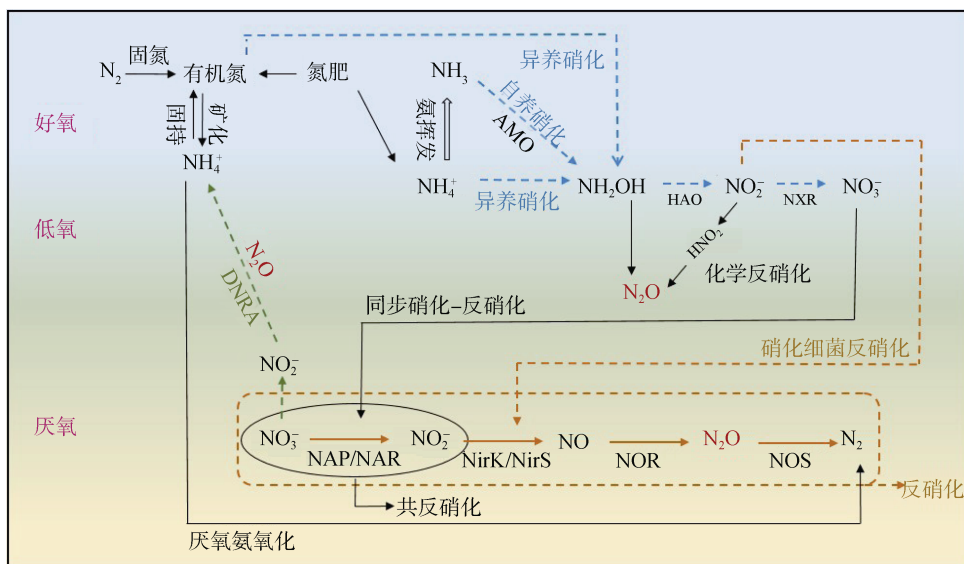
硝化细菌反硝化是氨氧化细菌 (Ammonia-oxidizing bacteria, AOB) 在低氧环境中将氨氧化产生的  $\text{NO}_2^-$  还原成  $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{N}_2$  的过程, 是微生物规避  $\text{NO}_2^-$  累积毒害的重要机制 [35]。研究发现, 长期施肥的黑土在高含水量 (70%WHC) 条件下硝化细菌反硝化对  $\text{N}_2\text{O}$  排放的贡献达到 15%, 较高的水分含量形成有利于硝化细菌反硝化进行的厌氧微域 [38]。但是, 目前还没有研究直接测定硝化细菌反硝化对黑土  $\text{N}_2\text{O}$  排放的贡献, 有待利用  $^{18}\text{O}$ - $^{15}\text{N}$  同位素共同标记技术来确定黑土硝化细菌反硝化对  $\text{N}_2\text{O}$  产生的贡献 [43]。

厌氧条件下 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>还原成 N<sub>2</sub>O 和 N<sub>2</sub>的过程统称为反硝化作用。反硝化作用产生 N<sub>2</sub>O 的能力远大于硝化作用，也是唯一能将 N<sub>2</sub>O 还原为 N<sub>2</sub>的过程，主要包括化学反硝化和生物反硝化两种。化学反硝化是指氨氧化过程的产物 NH<sub>2</sub>OH 与 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>发生化学分解，产生 NO、N<sub>2</sub>O 和 N<sub>2</sub>，通常发生在 pH < 4.5 的酸性土壤<sup>[44]</sup>。迄今，未见黑土中化学反硝化产生 N<sub>2</sub>O 的报道。考虑到黑土 pH 一般为 5.8~6.2<sup>[8]</sup>，化学反硝化对黑土 N<sub>2</sub>O 产生的贡献可能很低。

生物反硝化可由细菌或真菌驱动。真菌反硝化由于缺少 N<sub>2</sub>O 还原酶而只能进行不完整的反硝化作用，最终产物是 N<sub>2</sub>O。目前真菌反硝化对黑土 N<sub>2</sub>O 排放的贡献尚不清楚。东北黑土区主要为雨养旱作农田，土壤水分主要来自降水。有研究发现，在正常降水条件下，反硝化作用对黑土 N<sub>2</sub>O 产生的贡献不足 30%<sup>[45]</sup>。这主要是因为，土壤孔隙含水量 (WFPS) 小于 70%，没有形成充分的厌氧环境；此外，黑土较低的活性碳含量也是限制反硝化作用的重要原因<sup>[39, 45]</sup>。通常，在较大的空间尺度上 N<sub>2</sub>O 排放量与 SOC 含量表现为正相关关系，较高的 SOC 含量会增强微生物活性，促进反硝化作用产生更多

N<sub>2</sub>O<sup>[46]</sup>。但是，黑土尽管 SOC 含量相对较高，但主要由分子量较大且芳香程度较高的胡敏素和腐殖酸组成，不易矿化，碳水化合物、氨基酸等能被微生物直接利用的活性碳含量较低<sup>[47-48]</sup>。并且，SOC 含量越高，黑土的 C/N 也越高，其可分解性越低，限制了反硝化作用产生 N<sub>2</sub>O，因此东北黑土 N<sub>2</sub>O 排放量随 SOC 含量和 C/N 的增加而降低(图 2)。容重大的土壤中，孔隙度较低、通气性较差，容易产生厌氧环境<sup>[49]</sup>，从而可能部分解除黑土中反硝化作用的水分和活性碳的“双低”限制，进而促进 N<sub>2</sub>O 排放。

除反硝化过程外，NO<sub>3</sub><sup>-</sup>还可以通过异化还原过程转化为 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>，即硝酸盐异化还原成铵 (DNRA) 过程，N<sub>2</sub>O 为其中间产物<sup>[50]</sup>。与反硝化作用相比，DNRA 所需还原条件更为严格，因此多见于稻田、湿地、热带森林等缺氧或者有机碳含量高的生态系统<sup>[51-52]</sup>。然而，有研究发现在高含水量 (70%WFPS) 的农田黑土中，DNRA 也可以进行，是黑土的重要保氮机制<sup>[39]</sup>。理论上，DNRA 的发生能够降低 N<sub>2</sub>O 产生<sup>[53]</sup>，但目前 DNRA 对黑土 N<sub>2</sub>O 排放能力的影响尚不清楚。



注：AMO，氨单加氧酶；HAO，羟胺氧化还原酶；NXR，亚硝酸盐还原酶；NAR/NAP，硝酸异化还原酶；NirK/NirS，亚硝酸盐还原酶；NOR，NO 还原酶；NOS，N<sub>2</sub>O 还原酶。---→ 表示文献中已有报道的黑土中产生 N<sub>2</sub>O 途径。Note: AMO, Ammonia monooxygenase; HAO, Hydroxylamine oxidoreductase; NXR, Nitrite oxidoreductase; NAR/NAP, Membrane-bound nitrate reductase/Periplasmic nitrate reductase; NirK/NirS, Copper-containing nitrite reductase/Cytochrome cd1 nitrite reductase; NOR, Nitric oxide reductase; NOS, Nitrous oxide reductase; ---→ refers to the N<sub>2</sub>O production pathway in black soil reported in the literature.

图 3 土壤中 N<sub>2</sub>O 主要产生过程

Fig. 3 Main process of N<sub>2</sub>O production in the soils

### 3 农田黑土 N<sub>2</sub>O 产生的主要影响因素

#### 3.1 温度

硝化和反硝化作用能在较宽范围的温度下进行,最适温度为 25~35℃<sup>[54]</sup>。一般认为,低温条件下微生物活性受到抑制,N<sub>2</sub>O 排放较低,温度接近 0℃时甚至出现负排放<sup>[55]</sup>。微生物活性的最低生理阈值是-7℃<sup>[56]</sup>,但在东北黑土区观测到冬季土壤温度低至-15℃时仍存在微生物活动与 N<sub>2</sub>O 排放,可能是微生物长期处于寒冷环境下形成的适应性<sup>[57]</sup>。黑土 N<sub>2</sub>O 排放对温度升高的响应在低温条件下更加明显,可能是由于 *nirS* 型反硝化细菌的温度敏感性驱动<sup>[58]</sup>。考虑到气候变化的影响,在降雪量增加的情况下,更厚的“雪被”能够对黑土产生更强的物理隔离效应,有利于形成稳定且温和的结冰状态<sup>[59]</sup>,从而可能提高黑土低温季节 N<sub>2</sub>O 排放。

#### 3.2 水分条件

土壤水分通过改变土壤中 O<sub>2</sub> 含量、有效碳氮底物运输分布、微生物活性等影响 N<sub>2</sub>O 产生。在水分含量低、通气良好的土壤中,硝化作用主导 N<sub>2</sub>O 产生<sup>[60]</sup>,且随着土壤含水量增加而增加(30%~70% WFPS)。较高的含水量(70%~90% WFPS)导致土壤通气性变差,O<sub>2</sub> 含量减少,促进厌氧微域的形成,刺激反硝化作用并减弱硝化作用,此时硝化和反硝化作用同时存在,反硝化作用逐渐占主导地位,N<sub>2</sub>O 排放量达到最大。在东北黑土区的研究表明,降雨、灌溉、融雪等事件后,土壤水分含量显著增加,短期内 N<sub>2</sub>O 产生脉冲式排放<sup>[45, 61]</sup>。当土壤含水量进一步增加并高于田间持水量时,土壤孔隙被水充满或因黏土吸水膨胀而关闭,将抑制 N<sub>2</sub>O 向大气中排放,并促进 N<sub>2</sub>O 被进一步还原为 N<sub>2</sub><sup>[62]</sup>。例如,极端降雨事件导致黑土农田滞水,N<sub>2</sub>O 几乎没有排放,但是在随后的变干期,N<sub>2</sub>O 出现爆发式排放<sup>[45]</sup>。因此,水分对黑土 N<sub>2</sub>O 排放的影响不仅与土壤含水量有关,也与降水的频次和强度以及降水前的土壤水分条件等因素有关。

#### 3.3 冻融作用

东北黑土区的冻融作用主要发生在秋季作物收获后至次年春季播种前,可以分为四个时间段:土壤冻结期、覆雪期、融雪期和解冻期,N<sub>2</sub>O 的爆发式排放主要发生在融雪期和解冻期<sup>[63]</sup>。春融初期

土壤水分频繁发生“固-液”交替,冰晶的融化在土壤中形成大量有氧-低氧-无氧微域连续体,创造独特的氧化还原条件,有利于硝化和反硝化作用的同时进行<sup>[64]</sup>。与细菌相比,真菌可利用菌丝获取更多液态水和溶解在其中的养分,因此结冰土壤中可能更易发生真菌反硝化<sup>[65]</sup>。中后期土壤中液体水的体积显著增加,作物残留细根和微生物残体分解<sup>[66]</sup>,团聚体破碎、养分释放,活性碳氮底物供应量显著提高,进而刺激微生物活性<sup>[67]</sup>。有研究发现,黑土冻融循环过程中大粒径团聚体中产生的 N<sub>2</sub>O 大于小粒径,因此在秋季作物收获后土壤冻结前减少翻耕可能会降低冻融过程诱导的 N<sub>2</sub>O 排放<sup>[68-69]</sup>。

冻融期 N<sub>2</sub>O 的爆发式排放时间较短,但是一旦发生,就可能主导全年排放量。有研究发现,在加拿大季节性冻结农田,非生长季对 N<sub>2</sub>O 全年排放量的贡献可达 33%~48%<sup>[59, 70]</sup>。对我国东北黑土区的最新研究报道,在降雪量较高的年份,春融期 N<sub>2</sub>O 排放占全年总量的 54%~76%,解冻后土壤中较高的含水量和活性碳底物激发反硝化作用是 N<sub>2</sub>O 脉冲式排放的主要诱因<sup>[71]</sup>。施用硝化抑制剂显著抑制黑土农田生长季 N<sub>2</sub>O 排放,但是不影响甚至促进春融期 N<sub>2</sub>O 排放,因此较高的冻融 N<sub>2</sub>O 排放能够降低甚至抵消作物生长季硝化抑制剂对黑土 N<sub>2</sub>O 的减排效果<sup>[71]</sup>。因此,应加强非生长季特别是冻融期黑土 N<sub>2</sub>O 排放的测定频率,以免错失脉冲式排放峰值,低估全年累积排放量;同时也需要研发更加有效的调控措施,靶向削减黑土冻融 N<sub>2</sub>O 排放。

#### 3.4 田间管理措施

在农田生态系统中,施肥是影响土壤 N<sub>2</sub>O 排放的重要因素。通常认为,农田土壤 N<sub>2</sub>O 排放量与施氮量呈线性相关;Shcherbak 等<sup>[72]</sup>对全球农田土壤 N<sub>2</sub>O 排放的整合分析表明,N<sub>2</sub>O 排放量对氮输入量的响应明显快于线性增长,当氮肥用量高于作物需求时,N<sub>2</sub>O 排放量表现出指数增长趋势。本研究结果显示,东北黑土 N<sub>2</sub>O 排放量与施氮量具有显著的指数关系(图 2d)。这表明,施氮量过高导致氮素冗余时,将导致农田黑土 N<sub>2</sub>O 排放量急剧增加。因此,根据作物氮素需求,合理制定氮肥用量是减少黑土 N<sub>2</sub>O 排放的重要措施<sup>[73-74]</sup>。

与化肥相比,有机肥能够提供大量有效碳,增强土壤反硝化作用,对非生长季黑土 N<sub>2</sub>O 排放的促

进效应更明显<sup>[14, 75]</sup>。研究发现, 活性碳供应较无机氮对黑土 N<sub>2</sub>O 排放的促进作用更为明显<sup>[57, 75]</sup>, 因此施用分解率高的猪粪比鸡粪诱导黑土 N<sub>2</sub>O 排放的能力更强<sup>[45]</sup>。同样地, 秸秆还田可能会促进土壤反硝化作用进而导致 N<sub>2</sub>O 排放显著增加<sup>[76]</sup>; 但是, 有研究表明秸秆还田降低了黑土 N<sub>2</sub>O 排放<sup>[21]</sup>, 分析其原因可能是秸秆的施用带入大量活性碳, 提高了异养微生物的活性促进其对无机氮的固定, 或促进 N<sub>2</sub>O 的还原, 从而导致 N<sub>2</sub>O 排放量降低。在东北黑土区, 秸秆还田多在秋季作物收获后进行, 这可能会促进次年春融期 N<sub>2</sub>O 排放; 但是, 目前关于秸秆还田对东北黑土 N<sub>2</sub>O 全年排放效应的研究未见报道。

## 4 结论与展望

东北农田黑土活性有机碳底物供应不足, 且在正常降雨年份土壤含水量较低, 从而限制了反硝化作用的进行, N<sub>2</sub>O 主要由硝化作用产生, 因此其背景排放量和氮肥诱导的 N<sub>2</sub>O 排放系数均较低。与我国其他农田相比, 东北黑土区 N<sub>2</sub>O 排放的田间研究较少 (尤其是涵盖非生长季的周年尺度研究目前仅有 4 例)。冻融过程可能产生大量 N<sub>2</sub>O, 但是其排放强度的时空变化以及对整个黑土区 N<sub>2</sub>O 排放量的贡献并不清楚。关于黑土 N<sub>2</sub>O 排放对不同农艺管理措施和气候变化响应的研究也非常有限。因此, 今后亟需加强以下几方面的研究:

1) N<sub>2</sub>O 排放通量的原位监测。已有的田间原位试验集中在黑龙江省中部地区 (海伦和哈尔滨)。不同黑土区气候条件和土壤性质不同, N<sub>2</sub>O 排放可能存在很大差异。需要加强气候较湿润的黑龙江东部黑土区、气候较干旱的呼伦贝尔黑钙土区以及温度较高的吉林和辽宁北部薄层黑土区 N<sub>2</sub>O 排放的原位观测研究。此外, 原位观测研究方法多为静态箱-气相色谱法, 应考虑采用不同的方法进行监测, 如涡度相关法等, 完善东北黑土区 N<sub>2</sub>O 排放通量的原位监测网络。

2) 冻融过程中 N<sub>2</sub>O 爆发式排放机制。目前东北黑土区冻融过程中 N<sub>2</sub>O 排放的观测和机理研究十分匮乏, 需要加强冻融期田间 N<sub>2</sub>O 排放通量的观测频率, 探究冻融对土壤氮素转化与 N<sub>2</sub>O 产生过程的影响与微生物机制, 进而构建黑土冻融 N<sub>2</sub>O 减排技术。

3) 不同管理措施对黑土 N<sub>2</sub>O 排放的效应。以有机质为核心的土壤质量退化是黑土地面临的重大问题, 国家已经制定黑土地保护和利用的战略决策, 今后将重点通过保护性耕作、秸秆还田、有机肥施用等措施阻控黑土地退化、提高产能。应加强研究上述措施对黑土 N<sub>2</sub>O 排放的影响与机制, 从而制定实现黑土提质增效和 N<sub>2</sub>O 减排的“双赢”措施。

4) 全球变化对黑土 N<sub>2</sub>O 排放的影响。随着气候变化发展, 极端气候事件频发和强度不断提高, 位于中高纬度的东北黑土区是气候变化的敏感区, 可能成为 N<sub>2</sub>O 排放的“热点”区域, 需要加强气候变化对黑土 N<sub>2</sub>O 排放的效应与机制研究。同时需要结合气候变化和 N<sub>2</sub>O 排放模型, 评估极端气候情势下农田黑土 N<sub>2</sub>O 的排放强度。

## 参考文献 (References)

- [1] Thomson A J, Giannopoulos G, Pretty J, et al. Biological sources and sinks of nitrous oxide and strategies to mitigate emissions[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 2012, 367 (1593): 1157—1168.
- [2] Stocker F S, Qin D H, Plattner G K, et al. *Climate change 2013: The physical science basis/Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [3] Davidson E A. The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2 (9): 659—662.
- [4] Tian H Q, Yang J, Xu R T, et al. Global soil nitrous oxide emissions since the preindustrial era estimated by an ensemble of terrestrial biosphere models: Magnitude, attribution, and uncertainty[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25 (2): 640—659.
- [5] Stehfest E, Bouwman L. N<sub>2</sub>O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: Summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 74 (3): 207—228.
- [6] Han X Z, Zou W X. Research perspectives and footprint of utilization and protection of black soil in Northeast China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58 (6): 1341—1358. [韩晓增, 邹文秀. 东北黑土地保护利用研究足迹与科技研发展望[J]. *土壤学报*, 2021, 58 (6): 1341—1358.]
- [7] Wang J K, Li S Y, Zhang X D, et al. Spatial and temporal variability of soil quality in typical black soil area in Northeast China in 20 years[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15 (1): 19—24. [汪景宽, 李

- 双异, 张旭东, 等. 20年来东北典型黑土地区土壤肥力质量变化[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 19—24.]
- [ 8 ] Han X Z, Li N. Research progress of black soil in northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(7): 1032—1041. [韩晓增, 李娜. 中国东北黑土地研究进展与展望[J]. 地理科学, 2018, 38(7): 1032—1041.]
- [ 9 ] Shang Z Y, Zhou F, Smith P, et al. Weakened growth of cropland-N<sub>2</sub>O emissions in China associated with nationwide policy interventions[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(11): 3706—3719.
- [ 10 ] Chen Z M, Ding W X, Luo Y Q, et al. Nitrous oxide emissions from cultivated black soil: A case study in Northeast China and global estimates using empirical model[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2014, 28(11): 1311—1326.
- [ 11 ] Yue Q, Wu H, Sun J F, et al. Deriving emission factors and estimating direct nitrous oxide emissions for crop cultivation in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(17): 10246—10257.
- [ 12 ] Guenet B, Gabrielle B, Chenu C, et al. Can N<sub>2</sub>O emissions offset the benefits from soil organic carbon storage?[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(2): 237—256.
- [ 13 ] Li L J, Han X Z, You M Y, et al. Nitrous oxide emissions from Mollisols as affected by long-term applications of organic amendments and chemical fertilizers[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 452/453: 302—308.
- [ 14 ] Qiao Y F, Miao S J, Han X Z, et al. The effect of fertilizer practices on N balance and global warming potential of maize-soybean-wheat rotations in Northeastern China[J]. *Field Crops Research*, 2014, 161: 98—106.
- [ 15 ] Ni K, Ding W X, Zaman M, et al. Nitrous oxide emissions from a rainfed-cultivated black soil in Northeast China: effect of fertilization and maize crop[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48(8): 973—979.
- [ 16 ] Guo Y L, Luo L G, Chen G X, et al. Mitigating nitrous oxide emissions from a maize-cropping black soil in Northeast China by a combination of reducing chemical N fertilizer application and applying manure in autumn[J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2013, 59(3): 392—402.
- [ 17 ] Hao X Y, Zhou B K, Ma X Z, et al. Effects of nitrogen fertilizer management on greenhouse gas emissions from maize field in black soil[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(11): 3227—3238. [郝小雨, 周宝库, 马星竹, 等. 氮肥管理措施对黑土玉米田温室气体排放的影响[J]. 中国环境科学, 2015, 35(11): 3227—3238.]
- [ 18 ] Ding H, Wang Y S. Denitrification losses of nitrogen fertilizer and N<sub>2</sub>O emission from different crop-black soil systems in North-East China[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2004, 23(2): 323—326. [丁洪, 王跃思. 东北黑土区不同作物系统氮肥反硝化损失与N<sub>2</sub>O排放量[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(2): 323—326.]
- [ 19 ] Zheng Y, Tang S M, Li Y Y, et al. Effects of controlled release urea on maize yield and apparent N recovery rates in Heilongjiang Province[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2014, 22(1): 127—131. [郑雨, 唐树梅, 李玉影, 等. 控释尿素对黑龙江省玉米氮肥利用率及产量的影响[J]. 玉米科学, 2014, 22(1): 127—131.]
- [ 20 ] Wang Y, Yin S Y, Gao Q, et al. Effects of synchronous nutrient fertilizer on spring maize production and environment[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2019, 41(3): 324—329. [王寅, 尹释玉, 高强, 等. 同步营养肥在春玉米上的施用效果与环境效应[J]. 吉林农业大学学报, 2019, 41(3): 324—329.]
- [ 21 ] Gao H J, Zhang W J, Peng C, et al. Emission characteristics of greenhouse gas from maize field of black soil region under long-term fertilization[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(5): 422—430. [高洪军, 张卫建, 彭畅, 等. 长期施肥下黑土玉米田土壤温室气体的排放特征[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(5): 422—430.]
- [ 22 ] Han Y Y, Cao G J, Geng Y H, et al. Effects of agricultural wastes on greenhouse gas emission and global warming potential in black soil[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2017, 38(5): 36—42. [韩圆圆, 曹国军, 耿玉辉, 等. 农业废弃物还田对黑土温室气体排放及全球增温潜能的影响[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(5): 36—42.]
- [ 23 ] Yin Y L, Wang Z H, Tian X S, et al. Evaluation of variation in background nitrous oxide emissions: A new global synthesis integrating the impacts of climate, soil and management conditions[J]. *Global Change Biology*, 2021, <https://doi.org/10.1111/gcb.15860>.
- [ 24 ] Gu J X, Zheng X H, Wang Y H, et al. Regulatory effects of soil properties on background N<sub>2</sub>O emissions from agricultural soils in China[J]. *Plant and Soil*, 2007, 295(1/2): 53—65.
- [ 25 ] Xu Y X, Guo L P, Xie L Y, et al. Characteristics of background emissions and emission factors of N<sub>2</sub>O from major upland fields in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(9): 1729—1743. [徐玉秀, 郭李萍, 谢立勇, 等. 中国主要旱地农田 N<sub>2</sub>O 背景排放量及排放系数特点[J]. 中国农业科学, 2016, 49(9): 1729—1743.]
- [ 26 ] Zhou F, Shang Z Y, Zeng Z Z, et al. New model for capturing the variations of fertilizer-induced emission factors of N<sub>2</sub>O[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2015, 29(6): 885—897.
- [ 27 ] Shepherd A, Yan X Y, Nayak D, et al. Disaggregated N<sub>2</sub>O emission factors in China based on cropping parameters



- create a robust approach to the IPCC Tier 2 methodology[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 122: 272—281.
- [ 28 ] Xing G X. N<sub>2</sub>O emission from cropland in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 52 ( 2/3 ): 249—254.
- [ 29 ] Aliyu G, Luo J F, Di H J, et al. Nitrous oxide emissions from China's croplands based on regional and crop-specific emission factors deviate from IPCC 2006 estimates[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 669 ( 15 ): 547—558.
- [ 30 ] Romanovskaya A A. Methane and nitrous oxide emissions in the agricultural sector of Russia[J]. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2008, 33 ( 2 ): 117—124.
- [ 31 ] Nevison C, Andrews A, Thoning K, et al. Nitrous oxide emissions estimated with the CarbonTracker-Lagrange North American regional inversion framework[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2018, 32 ( 3 ): 463—485.
- [ 32 ] Rochette P, Worth D E, Lemke R L, et al. Estimation of N<sub>2</sub>O emissions from agricultural soils in Canada. I. Development of a country-specific methodology[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2008, 88 ( 5 ): 641—654.
- [ 33 ] Eggleston S, Buendia L, Miwa K, et al. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[M]// *Agriculture, forestry and other land use*. Hayama: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006.
- [ 34 ] Butterbach-Bahl K, Baggs E M, Dannenmann M, et al. Nitrous oxide emissions from soils: How well do we understand the processes and their controls?[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 2013, 368( 1621 ): 20130122.
- [ 35 ] Wrage N, Velthof G L, van Beusichem M L, et al. Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33 ( 12/13 ): 1723—1732.
- [ 36 ] Müller C, Stevens R J, Laughlin R J. A 15N tracing model to analyse N transformations in old grassland soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36 ( 4 ): 619—632.
- [ 37 ] Nelissen V, Rütting T, Huygens D, et al. Maize biochars accelerate short-term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 55: 20—27.
- [ 38 ] Cai Y J, Ding W X, Zhang X L, et al. Contribution of heterotrophic nitrification to nitrous oxide production in a long-term N-fertilized arable black soil[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2010, 41 ( 19 ): 2264—2278.
- [ 39 ] Chen Z M, Ding W X, Xu Y H, et al. Importance of heterotrophic nitrification and dissimilatory nitrate reduction to ammonium in a cropland soil: Evidences from a 15N tracing study to literature synthesis[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 91: 65—75.
- [ 40 ] Zhu T B, Meng T Z, Zhang J B, et al. Fungi-dominant heterotrophic nitrification in a subtropical forest soil of China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15 ( 3 ): 705—709.
- [ 41 ] Laughlin R J, Rütting T, Müller C, et al. Effect of acetate on soil respiration, N<sub>2</sub>O emissions and gross N transformations related to fungi and bacteria in a grassland soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 42 ( 1 ): 25—30.
- [ 42 ] Zhang J B, Müller C, Cai Z C. Heterotrophic nitrification of organic N and its contribution to nitrous oxide emissions in soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 84: 199—209.
- [ 43 ] Wrage-Mönnig N, Horn M A, Well R, et al. The role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide revisited[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2018, 123: A3—A16.
- [ 44 ] Medinets S, Skiba U, Rennenberg H, et al. A review of soil NO transformation: Associated processes and possible physiological significance on organisms[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 80: 92—117.
- [ 45 ] Chen Z M, Ding W X, Xu Y H, et al. Increased N<sub>2</sub>O emissions during soil drying after waterlogging and spring thaw in a record wet year[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2016, 101: 152—164.
- [ 46 ] Shang Z Y, Abdalla M, Kuhnert M, et al. Measurement of N<sub>2</sub>O emissions over the whole year is necessary for estimating reliable emission factors[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 259: 113864.
- [ 47 ] Wang F, Chen S, Yang H H, et al. Effect of glucose addition on N<sub>2</sub>O emission from three types of cultivated soils under ambient and freezing temperature[J]. *Ecological Science*, 2017, 36 ( 3 ): 31—35. [王凤, 陈思, 杨厚花, 等. 葡萄糖添加对室温和冻结过程土壤 N<sub>2</sub>O 排放特征影响[J]. *生态科学*, 2017, 36( 3 ): 31—35.]
- [ 48 ] Chen S, Zhang K Q, Ma X Y, et al. Effects of nitrate nitrogen application on N<sub>2</sub>O emissions from three types of soil during freezing process[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27 ( 6 ): 635—641. [陈思, 张克强, 麻晓越, 等. 外源硝态氮对典型耕作土壤冻结过程 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. *环境科学研究*, 2014, 27 ( 6 ): 635—641.]
- [ 49 ] Bouwman A F, Boumans L J M, Batjes N H. Emissions of N<sub>2</sub>O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16 ( 4 ): 6-1—6-13.
- [ 50 ] Putz M, Schleusner P, Rütting T, et al. Relative abundance of denitrifying and DNRA bacteria and their

- activity determine nitrogen retention or loss in agricultural soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2018, 123: 97—104.
- [ 51 ] Friedl J, De Rosa D, Rowlings D W, et al. Dissimilatory nitrate reduction to ammonium ( DNRA ), not denitrification dominates nitrate reduction in subtropical pasture soils upon rewetting[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2018, 125: 340—349.
- [ 52 ] Minick K J, Pandey C B, Fox T R, et al. Dissimilatory nitrate reduction to ammonium and N<sub>2</sub>O flux: Effect of soil redox potential and N fertilization in loblolly pine forests[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52 ( 5 ): 601—614.
- [ 53 ] Pandey C B, Kumar U, Kaviraj M, et al. DNRA: A short-circuit in biological N-cycling to conserve nitrogen in terrestrial ecosystems[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 738: 139710.
- [ 54 ] Subbarao G V, Ito O, Sahrawat K L, et al. Scope and strategies for regulation of nitrification in agricultural systems—challenges and opportunities[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2006, 25 ( 4 ): 303—335.
- [ 55 ] Cai Y J, Ding W X, Luo J F. Nitrous oxide emissions from Chinese maize-wheat rotation systems: A 3-year field measurement[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 65: 112—122.
- [ 56 ] Zimov S A, Zimova G M, Daviudov S P, et al. Winter biotic activity and production of CO<sub>2</sub> in Siberian soils: A factor in the greenhouse effect[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1993, 98 ( D3 ): 5017—5023.
- [ 57 ] Miao S J, Qiao Y F, Han X Z, et al. Frozen cropland soil in Northeast China as source of N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emissions[J]. *PLoS One*, 2014, 9 ( 12 ): e115761.
- [ 58 ] Cui P Y, Fan F L, Yin C, et al. Long-term organic and inorganic fertilization alters temperature sensitivity of potential N<sub>2</sub>O emissions and associated microbes[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2016, 93: 131—141.
- [ 59 ] Wagner-Riddle C, Congreves K A, Abalos D, et al. Globally important nitrous oxide emissions from croplands induced by freeze-thaw cycles[J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10 ( 4 ): 279—283.
- [ 60 ] Russow R, Stange C F, Neue H U. Role of nitrite and nitric oxide in the processes of nitrification and denitrification in soil: Results from <sup>15</sup>N tracer experiments[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41 ( 4 ): 785—795.
- [ 61 ] Shi H A, Li L J, You M Y, et al. Impact of soil temperature and moisture on soil N<sub>2</sub>O emission from mollisols under different land-use types[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32( 11 ): 2286—2292. [石洪艾, 李禄军, 尤孟阳, 等. 不同土地利用方式下土壤温度与土壤水分对黑土 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32 ( 11 ): 2286—2292.]
- [ 62 ] Smith K A, Thomson P E, Clayton H, et al. Effects of temperature, water content and nitrogen fertilisation on emissions of nitrous oxide by soils[J]. *Atmospheric Environment*, 1998, 32 ( 19 ): 3301—3309.
- [ 63 ] Chen Z, Han R Y, Yang S Q, et al. Fluxes of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from seasonal freeze-thaw arable soils in Northeast China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35 ( 2 ): 387—395. [陈哲, 韩瑞芸, 杨世琦, 等. 东北季节性冻融农田土壤 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 通量特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35 ( 2 ): 387—395.]
- [ 64 ] Chen Z, Yang S Q, Zhang Q W, et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil nitrogen loss and availability[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 ( 4 ): 1083—1094. [陈哲, 杨世琦, 张晴雯, 等. 冻融对土壤氮素损失及有效性的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36 ( 4 ): 1083—1094.]
- [ 65 ] Buckeridge K M, Banerjee S, Siciliano S D, et al. The seasonal pattern of soil microbial community structure in mesic low arctic tundra[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 65: 338—347.
- [ 66 ] Ludwig B, Wolf I, Teepe R. Contribution of nitrification and denitrification to the emission of N<sub>2</sub>O in a freeze-thaw event in an agricultural soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2004, 167 ( 6 ): 678—684.
- [ 67 ] Cai Y J, Wang X D, Ding W X, et al. Effects of freeze-thaw on soil nitrogen transformation and N<sub>2</sub>O emission: A review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 ( 5 ): 1032—1042. [蔡延江, 王小丹, 丁维新, 等. 冻融对土壤氮素转化和 N<sub>2</sub>O 排放的影响研究进展[J]. *土壤学报*, 2013, 50 ( 5 ): 1032—1042.]
- [ 68 ] Wang F, Gao S B, Bai L J, et al. Effect of soil particle sizes on N<sub>2</sub>O flux in freezing and thawing processes[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2010, 16 ( 1 ): 126—128. [王风, 高尚宾, 白丽静, 等. 冻融过程不同粒径土壤 N<sub>2</sub>O 排放特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2010, 16 ( 1 ): 126—128.]
- [ 69 ] Wang J H, Liu J, Ma H, et al. Effects of freezing and thawing on release characteristics of nitrous oxide emission in the black soil[J]. *Environment and Development*, 2014, 26 ( 4 ): 42—45. [王金鹤, 刘嘉, 马卉, 等. 冻融交替过程对黑土中氧化亚氮释放特性的影响[J]. *环境与发展*, 2014, 26 ( 4 ): 42—45.]
- [ 70 ] Wang Q H, Zhou F, Shang Z Y, et al. Data-driven estimates of global nitrous oxide emissions from croplands[J]. *National Science Review*, 2020, 7 ( 2 ): 441—452.
- [ 71 ] Chen Z M, Li Y, Xu Y H, et al. Spring thaw pulses decrease annual N<sub>2</sub>O emissions reductions by nitrification inhibitors from a seasonally frozen cropland[J]. *Geoderma*, 2021, 403: 115310.
- [ 72 ] Shcherbak I, Millar N, Robertson G P. Global

- metaanalysis of the nonlinear response of soil nitrous oxide ( N<sub>2</sub>O ) emissions to fertilizer nitrogen[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111 ( 25 ): 9199—9204.
- [ 73 ] Li Y, Ju X T. Rational nitrogen application is the key to mitigate agricultural nitrous oxide emission[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39( 4 ): 842—851. [李明, 巨晓棠. 农田氧化亚氮减排的关键是合理施氮[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39 ( 4 ): 842—851.]
- [ 74 ] Ju X T, Zhang C. The principles and indicators of rational N fertilization[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58( 1 ): 1—13. [巨晓棠, 张翀. 论合理施氮的原则和指标[J]. 土壤学报, 2021, 58 ( 1 ): 1—13.]
- [ 75 ] Cai Y J, Wang L F, Wen L Y, et al. Nitrous oxide emission from long-term fertilized black soil by laboratory incubation[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27 ( 2 ): 617—621. [蔡延江, 王连峰, 温丽燕, 等. 培养实验研究长期不同施肥制度下中层黑土氧化亚氮的排放特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27 ( 2 ): 617—621.]
- [ 76 ] Chen H H, Li X C, Hu F, et al. Soil nitrous oxide emissions following crop residue addition: A meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2013, 19 ( 10 ): 2956—2964.

(责任编辑: 卢萍)