

旱地农田氧化亚氮排放研究进展

吕晓东, 王 婷

(甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 针对北方旱地农田 N_2O 的产生机理、排放规律及影响因素进行综述, 指出影响旱地土壤 N_2O 排放的主要因素是施肥、灌水和农田耕作等人为因素, 合理施氮和增加土壤碳贮存是缓解温室气体排放的重要途径, 并提出今后应进一步加强不同立地条件下的长期高频农田生态系统 N_2O 排放观测、 N_2O 产生的关键微生物过程与机理与相关观测及通量相结合和农田温室气体排放模型的应用等方面的研究。

关键词: 氧化亚氮; 排放机制; 旱地农田; 研究进展

中图分类号: X171; X51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1463(2018)10-0067-07

doi: 10.3969/j.issn.1001-1463.2018.10.021

气候变化是当今全球面临的重大挑战, 人类活动引起的温室气体排放是全球气候变暖的主要原因。第四次 IPCC 评估报告表明, 农业是温室气体的主要排放源, 其中氧化亚氮(N_2O)是重要的温室气体排放源之一^[1], N_2O 对温室效应的贡献率约 5%^[2], 它的增温效应潜能是 CO_2 的 310 倍^[3]。据估计, 全球范围内农业排放 N_2O 占由于人类活动造成的 N_2O 排放总量的 60%, 如果不实施额外的农业政策, 预计到 2030 年农业源 N_2O 排放量将比 2005 年增加 35%~60%。IPCC 清单指南中指出, 农业 N_2O 的排放包括粪便管理中 N_2O 的排放、农田土壤的 N_2O 直接排放、农业氮肥的 N_2O 间接排放、热带草原和农业残留物燃烧产生的 N_2O 排放^[4], 其中农田土壤是农业 N_2O 的最大排放源, 占农业 N_2O 排放量的 80%左右。到 2030 年农田 N_2O 排放量为 1 258 kt, 增长 37%, 主要原因是人为氮肥投入的增加。

一般认为, 旱地土壤是 N_2O 的主要排放源, 稻田和天然湿地是 CH_4 的主要排放源。中国旱地农田面积占可耕地总面积的约 60%, 因此, 旱地农田温室气体排放对气候变暖的贡献尤为重要。近年来, 国内外学者已报道了大量农田土壤温室气体排放的长期和短期监测结果, 有关中国的研究主要集中在长江中下游稻田、华北地区冬小麦-夏玉米轮作、黄土高原雨养区冬小麦以及西北内陆灌溉区小麦和玉米田等生态系统。我们主要

针对北方旱地农田 N_2O 的产生机理、排放规律及影响因素进行综述, 以期明确今后的研究重点, 为提出减缓农田生态系统温室气体排放措施提供参考。

1 旱地农田土壤 N_2O 产生机制

土壤硝化作用(自养硝化和异养硝化)、反硝化作用(生物反硝化和化学反硝化)、硝化细菌反硝化以及硝态氮异化还原成铵作用等均能产生 N_2O ^[5]。但长期以来, 硝化(主要指自养硝化)和反硝化(主要指细菌异养反硝化)一直被认为是土壤 N_2O 产生的主要途径。

1.1 硝化过程

硝化过程指把还原态的氮 NH_3 被生物氧化成 NO_2^- 和 NO_3^- 的过程。主要包括 2 个阶段, 第 1 步是在氨单加氧酶和羟胺氧化还原酶的催化下将 NH_4^+ (或 NH_3)氧化成 NO_2^- , NH_2OH (NOH)是其中间产物; 第 2 步是在亚硝酸盐氧化还原酶的催化下将 NO_2^- 进一步氧化成 NO_3^- ^[6]。一般认为, 这两步分别由氨氧化细菌(AOB)、氨氧化古菌(AOA)和亚硝酸盐氧化菌等微生物驱动完成。

1.2 反硝化过程

反硝化作用通常指 NO_2^- 和 NO_3^- 在细菌活动的作用下, 或在有 NO_2^- 参与的化学反应过程中被还原为分子态的 N_2 或者 NO 和 N_2O 的过程, 分别由硝酸还原酶、亚硝酸还原酶、一氧化氮还原酶和一氧化二氮还原酶催化完成。

收稿日期: 2018-08-27

基金项目: 甘肃省科技厅国际合作项目“固定道保护性耕作应对气候变化的固碳减排技术研究”(1604WKCA005)。

作者简介: 吕晓东(1979—), 男, 甘肃瓜州人, 副研究员, 主要从事从事温室气体减排研究工作。联系电话: (0)13893636173。

2 影响旱地农田土壤 N₂O 排放的主要因素

影响农田 N₂O 排放的因素主要有土壤类型、作物类型、施肥及灌溉等农业措施和气候环境因素(温度、降水)等^[7-8],但本质上都直接或间接影响土壤微生物种类、数量及其生理生化过程,进而影响温室气体排放^[9-11]。

2.1 气候环境因素

2.1.1 土壤温度 N₂O 排放是温度、O₂ 和反应底物浓度以及传输过程交互作用的结果^[12]。15~35℃是硝化作用微生物活动的适宜温度范围,低于5℃或高于40℃则抑制硝化作用发生,反硝化微生物所要求的适宜温度为30~37℃^[13]。但N₂O在反应产物中的比重取决于O₂浓度,而不是硝化或反硝化过程速率^[14-16]。在土壤湿度适宜的范围内,N₂O排放通量与温度之间存在一定程度的正相关,N₂O排放通量随年均气温升高而升高^[17],N₂O排放与温度的变化呈正态分布,70%的排放量都发生在15~25℃温度范围内^[18]。对旱地农田而言,温度是影响N₂O季节排放变化的关键因子,也是土壤N₂O排放日变化的最主要控制因素^[19]。

2.1.2 土壤湿度 水分是影响O₂及其它气体的有效性及扩散率、易溶性物质的有效性以及微生物活动的关键因子^[20],其通过控制硝化及反硝化微生物的活性和合成而控制硝化速率和反硝化速率^[21-22]。水分含量还影响到土壤碳和氮的矿化,所有这些因素又都影响到N₂O的排放量。水分状况不仅影响土壤中N₂O的生成量,也极大地影响着水田N₂O向大气的传输^[23]。土壤含水量较低时,N₂O主要来自硝化过程;土壤含水量较高时,N₂O主要来自反硝化过程;在中等含水量情况下,硝化和反硝化作用产生的N₂O大约各占一半^[24]。由于产生N₂O的硝化过程和反硝化过程均受土壤水分的影响,当土壤含水量既能促进硝化作用又能促进反硝化作用时,N₂O生成与排放最多。土壤水分含量为饱和持水量的45%~75%时,硝化细菌和反硝化细菌都可能成为N₂O的主要制造者^[25];当土壤含水量大于阈值60%时,反硝化作用与土壤含水量呈明显的线性关系^[26]。Sehy等^[27]研究发现,当土壤硝酸盐和温度均不是微生物反硝化作用的限制因子时,N₂O排放通量与土壤孔隙含水量(WFPS)显著相关,WFPS为60%时为引起高N₂O排放的临界值。而Ruser等^[28]研究发现,当WFPS

大于等于70%时,因为反硝化作用的增强才使得N₂O的排放最大。土壤干湿交替能激发N₂O形成与排放,其原因主要是干燥时部分微生物死亡,增加了土壤中可降解有机碳量,氧的存在又促进了硝化过程。土壤湿润时发生反硝化作用,N₂O的产生比还原快,导致N₂O积累并使N₂O扩散排放成为可能,一般土壤在干湿交替处理下引起的N₂O排放量高于土壤持续湿润处理。

2.2 人为生产因素

2.2.1 耕作栽培因素 农田耕作栽培措施通过改变土壤环境、土壤理化特性及土壤生物类型、数量及活性来影响土壤温室气体的排放^[29]。耕作方式对土壤N₂O的排放研究结果不尽相同。一种观点认为,与传统耕作相比,免耕会促进N₂O的排放。主要原因可能是免耕措施包括最低限度的扰动土壤和作物秸秆还田措施,一方面能够促进土壤有机碳的固定^[30],另一方面通过刺激土壤微生物活性来增加土壤微生物量^[31],从而促进反硝化作用增加N₂O排放量^[32]。另一种观点认为,与传统耕作相比,免耕会减少N₂O的排放^[33]。主要原因可能是免耕措施使得土壤中C/N比例增大,N素由于土壤微生物对N源的抢夺而被充分利用,导致硝化和反硝化过程中N₂O排放减少^[34]。此外由于秸秆还田增加了土壤中的NO₃⁻-N含量,抑制了反硝化酶的活性,致使土壤N₂O排放减少^[35]。第三种观点认为免耕对N₂O的排放随着时间推移会发生增加或减少的变化。即在土壤从传统耕作方式改成免耕措施后的几年内,免耕会大量促进N₂O排放。而后的几十年免耕对N₂O排放的促进作用会逐年下降,直至N₂O排放重新达到稳定^[36]。

2.2.2 农田施肥因素 氮肥的施用与否、氮肥种类及施肥类型、施肥量等都对N₂O的产生有十分重要的影响。研究表明,N₂O的排放随着施肥量的增加而增加^[33],不同氮肥品种间的N₂O排放量也存在极显著差异,施用尿素、碳铵、氯化铵的农田N₂O排放量极显著高于施用硫酸铵的农田^[37]。与施用普通碳酸氢铵和尿素相比,长效碳酸氢铵与长效尿素能显著减少N₂O排放^[38]。黄国宏等^[39]对玉米田试验研究得出,长效碳酸氢铵比碳酸氢铵减少74%的N₂O排放,比尿素减少78%;缓释尿素比尿素减少62%的N₂O排放,比碳酸氢铵减少54%。Delgado等^[40]报道DCD和尿素一起施用于

大麦地, 21 d 后 N_2O 的释放量降低了 71%~82%。许多研究证实 N_2O 的排放量取决于施入土壤 NO_3^- 和 NH_4^+ 的有效性^[41-42], 在一些情形下, 来自于 NH_4^+ 或者尿素处理的 N_2O 排放量显著超过 NO_3^- 处理^[43]。

根系能够激发土壤中的硝化和反硝化作用, 使土壤中 N_2O 产生量增加, 其机理是通过根系酶的作用还是激发了土壤酶的活性目前还未能确定, 但已确定其影响作用同作物根系的表面积或重量成正比。有研究表明, 10~15 cm 土层是休耕地 N_2O 排放的主要场所^[44], 即 N_2O 排放活跃区域。旱田土壤中的 N_2O 主要通过土面释放, 而未表现出类似于稻田土壤 N_2O 释放的植株通道。Clayton 等^[45]发现, 多数 N_2O 逸出高峰均在施入硝态氮肥 21 d 后出现。在土壤积水时, N_2O 的逸出高峰出现在施肥 7 d 后^[46]。施肥及灌溉后, 土壤剖面中 N_2O 浓度和表层土壤的 N_2O 排放通量均较高。这可能是因为灌溉扰动了土壤, 从而影响了土壤的物理和生物学过程, 促进了土壤的反硝化作用, 产生了较多的 N_2O 。此外灌溉产生的渗透水能够延迟 N_2O 扩散到较深的土层, 使土壤变湿后可在瞬间产生 N_2O 浓度高值, 而在短期内增加了表层土壤 N_2O 的排放通量^[47]。

2.2.3 灌水因素 不同的灌溉方式、灌溉量和灌溉频率均影响土壤理化性状、土壤有效氮形态和微生物过程, 从而对土壤硝化、反硝化以及 N_2O 排放产生影响^[48]。不同灌溉方式对土壤温室气体排放通量的影响存在很大差异。已有研究显示, 漫灌条件下农田土壤 N_2O 排放主要来自于有氧条件下的硝化反应^[49], 而沟灌条件下农田土壤 N_2O 排放主要来自于厌氧条件下的反硝化作用。也有研究认为漫灌条件下 N_2O 主要来源于反硝化反应, 硝化反应是滴灌条件下 N_2O 的主要来源^[50]。郭树芳等^[51]在华北平原冬小麦田的研究表明, 微喷水肥一体化方式下土壤 N_2O 排放通量值比漫灌高 76.22%。与沟灌相比, 滴灌比沟灌可减少约 50% 的 N_2O 排放量, 其原因可能是滴灌改变了土壤剖面水分分布, 促进了硝化反应^[52-53]。灌溉量对土壤 N_2O 排放的影响主要是通过改变土壤湿度状况, 进而影响土壤中 N_2O 的生成量和 N_2O 向大气的传输过程。灌溉频率影响着土壤干湿交替循环的过程, 而它对土壤氮素的转化有重要影响^[54]。大量

研究显示, 干湿交替过程主要通过影响土壤氧化还原环境、土壤溶液中溶质及比例和土壤微生物的活性, 进而影响氮素在土壤中的累积、迁移和损失等过程^[55]。在淹水过程中土壤中缺少氧气, 因而主要进行反硝化作用, 土壤中的脱氮过程较强烈。在缓慢干燥的过程中, 由于氧气条件的好转, 硝化作用慢慢占主导作用, 因而硝态氮含量有升高的趋势。

2.3 土壤微生物

2.3.1 土壤类型对土壤微生物的影响 Ma 等^[56]对北美典型两种不同地貌土壤(湿地农田土和非农田土)的硝化细菌、反硝化细菌群落结构、丰度及 N_2O 排放的研究发现, 土壤产生的 N_2O 主要来自硝化作用, 培养增加了硝化细菌数量, 反硝化细菌的数量没有变化, 不同地形和不同土地利用方式下硝化细菌和反硝化细菌群落结构及数量的差异并未表现出相应 N_2O 排放的差异。汪峰等^[57]比较分析中国东部不同季风气候区中海伦黑土、封丘潮土和鹰潭红壤, 认为 3 种土壤的 AOB 群落组成地带性差异, 是 AOB 类群与环境条件长期适应的结果, 受土壤 NH_4^+ 浓度、溶解 O_2 、土壤盐分、土壤 pH 和温度等因素的综合影响。郑燕等^[58]以紫潮泥和红黄泥 2 种不同质地的水稻土壤作为研究对象, 通过室内培养试验, 分析施用硝态氮肥对 N_2O 释放和反硝化基因(narG、nosZ)丰度的影响, 并探讨反硝化基因丰度与 N_2O 释放之间的关系。结果表明, 在 72 h 培养过程中, 施氮改变了紫潮泥反硝化基因(narG/nosZ)的丰度, 但并未明显影响红黄泥反硝化基因(narG/nosZ)丰度。通过双变量相关分析发现, 除了紫潮泥 narG 基因外, 其他反硝化基因丰度和 N_2O 释放之间并没有显著相关性。

2.3.2 施肥对土壤微生物的影响 Enwall 等^[59]发现, 施有机肥对反硝化细菌群落组成无明显差异性, 而 Wolsing 等^[60]基于 nirK 基因研究发现施有机肥和无机肥土壤反硝化细菌群落结构显著不同。Shen 等^[61]对华北平原长期施用不同氮肥农田土壤研究认为, 不同氮肥组合增加了土壤硝化速率, 显著影响土壤 AOB 的种群结构和丰度, 而对 AOA 影响较小。但程林等^[62]和武传东等^[63]对黄土高原区长期施肥农田土壤的研究认为, 不同施肥措施均改变了土壤中 AOB 和 AOA 群落多样性和丰度。

贺纪正等^[64]总结以往的研究认为在酸性土壤条件下, AOA 的丰度和群落组成对长期施肥处理及其引起的土壤性质变化的响应比 AOB 更明显。相反, 在碱性土壤条件下, 尽管不同施肥处理下土壤 AOA 的数量均显著高于 AOB, 但不同施肥处理引起 AOB 群落结构发生变化, 而对 AOA 的群落组成没有明显影响。关于施肥对反硝化菌的影响的研究表明, 施氮改变了反硝化基因的丰度, 但反硝化基因丰度和 N₂O 释放之间无明显相关性。Dandie 等^[65]利用实时 PCR 技术研究不同季节土豆地反硝化基因(nirK, nosZ, cnorB)丰度变化的试验中发现, NO₃⁻-N 是影响 N₂O 释放和反硝化速率的重要因素, 但是却对反硝化基因丰度影响很小。Mergel 等^[66]也通过基因探针试验证明土壤反硝化基因丰度并不受 NO₃⁻-N 浓度的影响。Wallenstein 等^[67]指出 NO₃⁻-N 浓度并不是影响反硝化基因丰度的主要因素, 基因丰度会受到 NO₃⁻-N 以外的其它环境因素如水分、碳含量、pH 等的影响。

2.3.3 季节与耕作管理对土壤微生物的影响 Smith 等^[68]研究认为季节变化(土壤温度, 水分以及养分含量和其他环境因子存在差异)显著影响了硝化细菌和反硝化细菌的多样性及数量, 而且在一定时期内耕作措施也影响了群落多样性。3 月份耕作措施显著影响了硝化细菌和反硝化细菌群落结构。

2.3.4 灌水对土壤微生物的影响 岳进等^[69]监测了中国海伦黑土和沈阳棕壤土稻田在连续灌溉和间歇性灌溉中 N₂O 排放和硝化细菌和反硝化细菌数量之间的关系(MPN计数法)。多重回归分析表明, 在间歇性灌溉下两种土壤排放的 N₂O 与土壤反硝化细菌均显著相关。沈阳棕壤土在两种灌溉方式下产生的 N₂O 与硝化细菌数量显著相关。Szukics 等^[70]的研究发现, 在森林土壤中 NO₃⁻-N 不受限制时, nirK 基因反硝化细菌数量随着土壤水分的增加而增加。

2.3.5 硝化抑制剂对土壤微生物的影响 Kleineidam 等^[71]田间试验研究了 DMPP 施肥后 14、28、56 d 根际土及土体土的 AOB 和 AOA 丰度的变化, 发现在根际土及土体土中, AOB 数量均受到明显的抑制作用, 而 AOA 数量到施肥后第 8 天仍没发生变化。Carneiro 等^[72]就硝化抑制剂 DCD 对施入硫酸铵的耕作土壤中微生物群落结构及 N₂O 排放量的影响进行了研究, 发现使用硝化抑制剂 DCD

使 N₂O 排放量降低了 80%, 且显著降低了土壤微生物(氨氧化细菌和亚硝化细菌)的数量及活性, 而微生物群落结构未发生变化。

3 展望

综上所述, 目前国内外对农田生态系统 N₂O 排放的研究集中于宏观因子的探讨, 如气候因子、耕种和管理方式、施肥量、施肥种类等对 N₂O 排放的影响, 今后还需要从以下几个方面进一步研究。一是加强不同立地条件下的长期高频农田生态系统 N₂O 排放观测, 掌握其排放规律和排放量, 从而为提出减缓温室气体排放措施提供科学依据; 二是加强微生物响应农田环境因子的变化特征以及微生物变化与土壤 N₂O 排放的关系方面的研究, 重点关注氨氧化古菌对硝化过程的重要性及对 N₂O 排放的贡献、不同立地条件下氨氧化细菌、氨氧化古菌和反硝化细菌随土壤环境条件变化的响应和 N₂O 产生的关键微生物过程与机理与相关观测及通量相结合等研究; 三是加强农田温室气体排放模型的应用。综合分析已有研究资料, 确定土壤温室气体排放量模拟计算模型和参数, 从区域或更大尺度上模拟和估算温室气体排放, 从而正确评价温室气体的温室效应, 为农业生产中制定减排策略提供参考依据。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2007: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 63-67.
- [2] IPCC. Climate Change 2007: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 23-24.
- [3] IPCC. Special Report on Emissions Scenarios, Working Group III, Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 3-4.
- [4] IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 7-22.
- [5] BAGGS EM. A review of stable isotope techniques for N₂O source partitioning in soils: Recent progress, remaining challenges and future considerations [J]. Rapid

- Communications in Mass Spectrometry, 2008, 22(11): 1664-1672.
- [6] CANFIELD D E, A N GLAZER, P G Falkowski. The evolution and future of earth's nitrogen cycle[J]. Science, 2010, 330(6001): 192-196.
- [7] 焦燕, 黄耀. 影响农田氧化亚氮排放过程的土壤因素[J]. 气候与环境研究, 2003, 18(14): 457-466.
- [8] 于萍萍, 张进忠, 林存刚. 农田土壤 N₂O 排放过程影响因素研究进展[J]. 环境与可持续发展, 2006(5): 20-11.
- [9] 秦小光, 蔡炳贵, 吴金水, 等. 土壤温室气体昼夜变化及其环境影响因素研究[J]. 第四纪研究, 2005, 25(3): 376-388.
- [10] SMITH K A, BALL T, CONEN F, *et al.* Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interaction of soil physical factors and biological processes [J]. European Journal of Soil Science, 2003, 54: 779-791.
- [11] HANSEN M N, HENRIKSEN K, SOMMER S G. Observations of production and emission of greenhouse gases and ammonia during storage of solids separated from pig slurry: Effects of covering [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40: 4172-4181.
- [12] WILLIAMS E J, HUTCHINSON G L AND FEHSENFELD F C. NO_x and N₂O emission from soil[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1992, 6(4): 351-388.
- [13] VAN SPANNING R J M, A H Stouthamer, S C Baker, *et al.* Genus XII. Paracoccus. in: Garrity, G. M.(Ed.). Bergey's Manual of Systematic Bacteriology. Volume 2: The Proteobacteria, Part C The Alpha-, Beta-, Delta-, and Epsilon proteobacteria. 2nd edition[M]. New York, NY, USA: Springer, 2005: 197-204.
- [14] ANDERSON I C, LEVINE J S. Relative rates of nitric oxide and nitrous oxide production by nitrifiers, denitrifiers and nitrate respirers[J]. Appl. Environ. Microbiol., 1986, 51: 938-945.
- [15] FIRESTONE M K, DAVIDSON E A. Microbiological basis of NO and N₂O production and consumption in soil [M]. In: Exchange of Trace Gases between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere(ed. M. O. Andreae and D. S. Schimel). New York: John Wiley, 1989: 7-21.
- [16] POTH M, FOCHT D D. 15N kinetic analysis of N₂O production by nitrosomonas europea: An examination of nitrifier denitrification[J]. Appl. Env. Microbiol., 1985, 49: 1134-1141.
- [17] 叶欣, 李俊, 王迎红, 等. 华北平原典型农田土壤氧化亚氮的排放特征[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6): 1186-1191.
- [18] 徐文彬, 刘维屏, 刘广深. 温度对旱田土壤 N₂O 排放的影响研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 1-7.
- [19] 郑循华, 王明星, 王跃思. 温度对农田 N₂O 产生与排放的影响[J]. 环境科学, 1997, 18(5): 1-5.
- [20] LINN D M, DORAN J W. Effects of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and non-tilled soils[J]. Soil. Sci. Soc. Am J., 1984, 48: 1267-1272.
- [21] MACDUFF J H, WHITE R E. Net mineralization and nitrification rates in a clay soil measured and predicted in permanent grassland from soil temperature and moisture content[J]. Plant and Soil, 1985, 86: 151-172.
- [22] KEENEY D R, FILLERY I R, MARX G P. Effect of temperature on the gaseous nitrogen products of denitrification in a silt loam soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 1979, 43: 1124-1128.
- [23] ANDSON I C, POTH M A. Controls on fluxes of trace gases from Brazilian Cerrado soils[J]. J. Environ. Qual., 1998, 27: 1117-1224.
- [24] 黄国宏, 陈冠雄, 韩冰. 土壤含水量与产生途径研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(1): 53-56.
- [25] 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): 35-41.
- [26] DANIEL R S, ALI M S, GREGORY W M. Effect of soil water content on denitrification during cover crop decomposition[J]. Soil Science, 2000, 165(4): 365-371.
- [27] SEHY U, RUSER R, MUNCH J C. Nitrous oxide fluxes from maize fields: relationship to yield, site specific fertilization, and soil conditions [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2003, 99: 97-111.
- [28] RUSER R., FLESSA H., RUSSOW R., *et al.* Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture and rewetting [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006., 38: 263-274.
- [29] 孙文泰, 马明, 刘兴禄, 等. 地表覆盖方式对陇东旱塬苹果园根际土壤微生物与酶活性的影响[J]. 甘肃农业科技, 2017(12): 64-68.
- [30] ALMARAZ J J, MABOOD F, ZHOU X M, *et al.* Carbon dioxide and nitrous oxide fluxes in corn grown under two tillage systems in Southwestern Quebec [J]. Soil Science Society of American Journal, 2006, 73: 113-119.

- [31] 高 军. 地面覆盖方式对苹果园土壤水分及微生物群落的影响[J]. 甘肃农业科技, 2017(2): 41-42.
- [32] 邹国元, 张福锁, 陈新平, 等. 秸秆还田对旱地土壤反硝化的影响[J]. 中国农业科技导报, 2001, 3(6): 47-50.
- [33] SNYDER C S, BRUULSEMA T W, JENSEN T L, *et al.* Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 133: 247-266
- [34] 蒋静艳, 黄耀宗, 宗良纲. 水分管理与秸秆施用对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2003, 23(5): 552-556.
- [35] 王改玲, 郝明德, 陈德立. 秸秆还田对灌溉玉米田土壤反硝化及 N₂O 排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(6): 840-844.
- [36] LEMKE R L, JANZEN H H. Implications for increasing the soil carbon store: calculating the net greenhouse gas balance of no-tillage farming[M]. In: Reay D.S., Hewitt C.N., Smith K.A., Grace J. Greenhouse gas sinks. Printed and bound in the UK by Athenaeum Press Ltd, Gateshead. 2007: 58-73.
- [37] 丁 洪, 王跃思, 李卫华. 玉米-潮土系统中不同氮肥品种的反硝化损失与 N₂O 排放量[J]. 中国农业科学, 2004, 37(12): 1886-1891.
- [38] 李方敏, 樊小林, 刘 芳, 等. 控释肥料对稻田氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2170-2174.
- [39] 黄国宏, 陈冠雄, 张志明, 等. 玉米田 N₂O 排放及减排措施研究[J]. 环境科学学报, 1998, 18(4): 344-349.
- [40] DELGADO J A, MOSIER A R. Mitigation alternatives to decrease nitrous oxides emissions and urea-nitrogen loss and their effect on methane flux [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25(5): 1105-1111.
- [41] WEIER K L, DORAN J W, POWER J F, *et al.* Denitrification and the dinitrogen/ nitrous oxide ratio as affected by soil water, available carbon, and nitrate[J]. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57: 66-72.
- [42] SKIBA, U SMITH, K A, FOWLER D. Nitrification and denitrification as sources of nitric oxide and nitrous oxide in a sandy loam soil [J]. *Soil Biol. Biolchem.*, 1993, 25: 1527-1536.
- [43] MULVANEY R L, KHAN S A, MULVANEY G S. Nitrogen fertilizer promote denitrification[J]. *Biol. Fertil. Soils*, 1997, 24: 211-220.
- [44] 白红英, 耿增超, 张一平. 旱耕人为土 N₂O 排放动力学特征及其影响因素[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2003, 30(2): 82-88.
- [45] CLAYTON H, MC TAGGART T P, PARKER J, *et al.* Nitrous oxide emission from fertilized grassland—a year study of the effects of N fertilizer form and environmental condition[J]. *Biol. Fertil. Soils*, 1997, 25: 252-260.
- [46] MULVANEY R L, KHAN S A, MULVANEY G S. Nitrogen fertilizer promote denitrification[J]. *Biol. Fertil. Soils*, 1997, 24: 211-220.
- [47] BRUMME R, BEESE F. Effects of liming and fertilization on emission of CO₂ and N₂O from a temperate forest [J]. *J. Geophys. Res.*, 1992, 97: 12851-12858.
- [48] BURT C, CONNOR K O, RUEHR T. Fertigation. Irrigation Training and Research Center[M]. San Luis Obispo: California Polytechnic State University, 1998.
- [49] JU X T, LU X, GAO Z, *et al.* Processes and factors controlling N₂O production in an intensively managed low carbon calcareous soil under sub-humid monsoon conditions[J]. *Environmental Pollution*. 2011, 159: 1007-1016.
- [50] TARYN L K, EMMA C S. Reduced nitrous oxide emissions and increased yields in California tomato cropping systems under drip irrigation and fertigation [J]. *Agriculture, Ecosystem and Environment*. 2013. 170: 16-27.
- [51] 郭树芳, 齐玉春, 尹飞虎, 等. 不同灌溉方式对华北平原冬小麦田土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1880-1890.
- [52] KALLENBACH C M, ROLSTON D E, HORWATH W R. Cover cropping affects soil N₂O and CO₂ emissions differently depending on type of irrigation[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 137(3/4): 251-260.
- [53] SÁNCHEZ-MARTÍN L, ARCE A, BENITO A, *et al.* Influence of drip and furrow irrigation systems on nitrogen oxide emissions from a horticultural crop[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(7): 1698-1706.
- [54] XIANG S R, DOYLE A, HOLDEN P A, *et al.* Drying and rewetting effects on C and N mineralization and microbial activity in surface and subsurface California grassland soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(9): 2281-2289.
- [55] 朴河春, 刘广深, 洪业汤. 干湿交替和冻融作用对土壤肥力和生态环境的影响[J]. 生态学杂志, 1995, 14(6): 29-34.
- [56] MA W K, BEDARD-HAUGHN A, SICILIANO S D,

- et al.* Relationship between nitrifier and denitrifier community composition and abundance in predicting nitrous oxide emissions from ephemeral wetland soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 14: 1114–1123.
- [57] 汪峰, 曲浩丽, 丁玉芳, 等. 三种农田土壤中氨氧化细菌 *amoA* 基因多样性比较分析[J]. *土壤学报*, 2012, 49(2): 347–353.
- [58] 郑燕, 侯海军, 秦红灵, 等. 施氮对水稻土 N_2O 释放及反硝化功能基因 (*narG/nosZ*) 丰度的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(11): 3386–3393.
- [59] ENWALL K, PHILIPPOT L, HALLIN S. Activity and composition of the denitrifying bacterial community respond differently to long-term fertilization [J]. *Applied and Environmental Microbiology*. 2005, 71 (12): 8335–8343.
- [60] WOLSING M, PRIEME A. Observation of high seasonal variation in community structure of denitrifying bacteria in arable soil receiving artificial fertilizer and cattle manure by determining T-RFLP of *nir* gene fragments[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2004, 48: 261–271.
- [61] SHEN J P, ZHANG L M, ZHU Y G, *et al.* Abundance and composition of ammonia-oxidizing bacteria and ammonia-oxidizing archaea communities of an alkaline sandy loam [J]. *Environmental Microbiology*, 2008, 10(6): 1601–1611.
- [62] 程林, 刘桂婷, 王保莉, 等. 渭北旱塬长期施肥试验中氨氧化细菌的多样性及群落结构分析[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(7): 1333–1340.
- [63] 武传东, 辛亮, 李秀颖, 等. 长期施肥对黄土旱塬黑垆土氨氧化古菌群落多样性和丰度的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(20): 4230–4239.
- [64] 贺纪正, 张丽梅. 土壤氮素转化的关键微生物过程及机制[J]. *微生物通报*, 2013, 40(1): 98–108.
- [65] DANDIE C E, BURTON D L, ZEBARTH B J, *et al.* Changes in bacterial denitrifier community abundance over time in an agricultural field and their relationship with denitrification activity[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2008, 74(19): 5997–6005.
- [66] MERGEL A, SCHMITZ O, MALLMANN T, *et al.* Relative abundance of denitrifying and dinitrogen-fixing bacteria in layers of a forest soil[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2001, 36(1): 33–42.
- [67] WALLENSTEIN M D, MYROLD D D, FIRESTONE M, *et al.* Environmental controls on denitrifying communities and denitrification rates: insights from molecular methods[J]. *Ecological Applications*, 2006, 16(6): 2143–2152.
- [68] SMITH J, WAGNER-RIDDLE C, DUNFIELD K. Season and management related changes in the diversity of nitrifying and denitrifying bacteria over winter and spring[J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, 44: 138–146.
- [69] 岳进, 黄国宏, 梁巍, 等. 不同水分管理下稻田土壤 CH_4 和 N_2O 排放与微生物菌群的关系[J]. *应用生态学报*, 2003(14): 2273–2277.
- [70] SZUKICS U, ABELL G C J, HÖDL V, *et al.* nitrifiers and denitrifiers respond rapidly to changed moisture and increasing temperature in a pristine forest soil [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2010, 172: 395–406.
- [71] KLEINEIDAM K, KOŠMRLJ K, KUBLIK S, *et al.* Influence of the nitrification inhibitor 3, 4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) on ammonia-oxidizing bacteria and archaea in rhizosphere and bulk soil [J]. *Chemosphere*, 2011, 84: 182–186.
- [72] CARNEIRO J, CARDENAS L M, HATCH D J, *et al.* Effect of the nitrification inhibitor dicyandiamide on microbial communities and N_2O from an arable soil fertilized with ammonium sulphate[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2010, 8: 237–246.

(本文责编: 陈伟)

欢迎订阅下列刊物

刊名	邮发代号	刊期	单价/元	全年价/元	地址/邮编	电话	E-mail
中国种业	82-132	月刊	20.00	240.00	北京市中关村南大街 12 号 中国种业编辑部(100081)	010-82105796	chinaseedqks@163.com
现代园艺	44-114	月刊	8.00	96.00	江西省樟树市双金 《现代园艺》杂志社(331213)	0795-7831008	xdyy008@126.com
中国生态农业学报	82-973	月刊	35.00	420.00	河北省石家庄市槐中路 286 号中科院遗传发育所农业资源研究中心 《中国生态农业学报》编辑部(050022)	0311-85818007	editor@sjziam.ac.cn
特种经济动植物	12-183	月刊	4.00	48.00	长春市净月经济开发区聚业大街 4899 号(130112)	0431-81919599	tzjjdzw@126.com