

水肥对稻麦轮作农田 N_2O 排放影响及减排的研究进展

孙星, 金海涛, 徐林文, 余桂香, 李向阳, 曹开勋, 陈世勇, 肖新* (安徽科技学院资源与环境学院, 安徽凤阳 233100)


摘要 水分管理与施肥管理是季节性干旱区农业生产中重要的组成部分。肥料除了有改良土壤、培肥地力的效果, 更重要的是与土壤水分相互协作, 达到“以水调肥”和“以肥调水”的耦合效应。此外, 农田温室气体的排放关系到土壤微生物环境和全球温室气候的变化。在阐述 N_2O 产生机制的基础上, 从水分管理、施肥管理和水氮互作管理方面综述其对 N_2O 排放的影响, 并根据温室效应等因素提出合理的减排技术措施, 以期科学评估温室气体变化, 为我国实行低碳农业和降低温室效应提供理论依据。

关键词 氧化亚氮; 稻麦轮作系统; 农田土壤; 减排技术

中图分类号 S 181; S 157.4 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)05-0028-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.05.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Research Progress on Effects of Water and Fertilizer on N_2O Emission and Emission Reduction in Rice-wheat Rotation Farmland
SUN Xing, JIN Hai-tao, XU Lin-wen et al (College of Resources and Environment, Anhui University of Science and Technology, Fengyang, Anhui 233100)

Abstract Water management and fertilization management are important components of agricultural production in seasonal arid areas. In addition to the effect of improving soil and enhancing soil fertility, fertilizer is more important to cooperate with soil moisture to achieve the coupling effect of “regulating fertilizer with water” and “regulating water with fertilizer”. In addition, greenhouse gas emissions from farmland are related to soil microbial environment and global greenhouse climate change. On the basis of expounding the formation mechanism of N_2O , the influence of water management, fertilization and water, nitrogen interactions on N_2O emissions were summarized, and the reasonable emission reduction technologies were proposed according to factors such as the greenhouse effect, in order to scientifically assess greenhouse gas changes and provide theoretical basis for China to implement low-carbon agriculture and reduce greenhouse effect.

Key words N_2O ; Rice-wheat rotation system; Farmland soil; Emission reduction technology

自工业化以来, 人类活动排放了大量的甲烷(CH_4)、二氧化碳(CO_2)和氧化亚氮(N_2O)等温室气体。其中 N_2O 是臭氧层遭到破坏的重要原因之一, 对大气造成污染从而导致温室效应不断积累, 严重威胁到人类的生存。截至 2011 年, 大气中 N_2O 的浓度已升至 0.58 mg/m^3 , 比工业革命前增加了 20%^[1], 这势必会加剧全球温室效应的进程。根据我国气候变化第二次国家信息通报, 农业源释放的温室气体排放量为 8.20 t CO_2 当量, 占排放总量的 10.97%, 其中农业活动 N_2O 排放量占我国 N_2O 排放总量的 73.79%^[2]。已有研究表明, 土壤会向大气中排放 80%~90% 的 N_2O ^[3]。而农田作为陆地生态系统的主要组成部分, 其温室气体排放动态对全球气候变化具有重要影响。作为农业大国, 我国对 N_2O 气体减排和发展低碳农业刻不容缓。

稻麦轮作是我国重要的农作物种植体系, 目前水稻—冬小麦的种植面积已达 530 多万 hm^2 ^[4]。稻田的氮素与水分管理是季节性干旱区农业生产中重要的组成部分, 氮素影响仅次于水^[5]。通过合理水分和氮肥的投入, 可以实现“以肥调水”和“以水促肥”的双重目的^[6]。实践证明, 在农业生产中, 采用节水灌溉技术能获得与传统水作水稻差不多的产量, 同时能够节水 60%~100%^[7]。水氮互作管理的水分利用较常

规灌溉方法有明显的增产效果, 灌溉用水量减少了 17.49%, 同时提高了土壤氮素利用效率, 促进了水稻根系生长^[8]。合理施肥不仅能提高土壤的水分利用率, 而且还能与土壤水分互动, 达到明显的协同互作效果。针对稻麦轮作农田, 从水分管理和施肥管理出发, 揭示影响 N_2O 排放因素, 对实现农业绿色增产增效和缓解温室效应具有重要意义。

1 氧化亚氮(N_2O)产生机制

全球 N_2O 排放源主要来自农田的土壤, 贡献率高达 70%。近年研究表明, 大气中的 N_2O 总量有 90% 来自于土壤^[9]。土壤 N_2O 的产生是一个复杂的生化过程, 包括硝化作用、自养反硝化作用、异养反硝化作用、硝酸盐同化作用、硝酸盐异化还原作用以及化学反硝化作用等^[10]。其中耕作土壤中 N_2O 主要来源于微生物的硝化作用和反硝化作用, 而纯化学过程的贡献很有限^[11]。

硝化作用是由自养型细菌把氨或铵盐氧化为硝酸的过程。硝化过程主要分为铵根(NH_4^+)氧化亚硝酸根(NO_2^-)和 NO_2^- 氧化硝酸根(NO_3^-)这两个阶段^[12]。在此过程中, 中间过渡产物羟胺(NH_2OH)或 NO_2^- 会发生化学分解或不完全氧化释放出 N_2O 。 NH_4^+ 和 NO_2^- 的浓度是影响硝化作用的重要因素, 通过加入一定浓度的 NH_4^+ 可增加硝化微生物的数量从而提高硝化作用能力。与此同时, 在土壤的多种微生物驱动下, 反硝化作用($NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$)也在不断进行。反硝化作用是在厌氧或缺氧的条件下, 微生物将硝酸盐及亚硝酸盐还原成氮气(N_2)的过程, 最终产物以 N_2 的形式返回到大气中。在此过程中, 一部分 N_2O 会作为中间产物直接释放到大气中, 产生温室效应^[13]。硝酸盐异化作用还原产生 NH_4^+ 以及硝化微生物的反硝化作用等也会产生

基金项目 国家重点研发计划“粮食丰产增效科技创新”专项(2017YFD03-01302); 安徽省自然科学基金项目(1608085MC59); 安徽省科技重大专项计划项目(16030701102); 安徽省科技攻关项目(1604a0702011); 安徽省高校自然科学基金项目(KJ2018A0532)。

作者简介 孙星(1994—), 男, 安徽铜陵人, 硕士研究生, 研究方向: 农业资源利用。* 通信作者, 教授, 博士, 从事环境生态与区域规划研究。

收稿日期 2019-08-22

N₂O。此外,灌水、降雨以及土壤本身的 pH、硝酸盐浓度和有机质含量等都会影响土壤的水分状况和通气状况,从而产生 N₂O 这个中间产物。因此,反硝化作用产生 N₂O 的量远大于硝化作用产生的。

2 水肥对 N₂O 排放的影响研究

2.1 水分管理 水分管理是制约 N₂O 排放的一个重要因素^[14]。徐华等^[15]认为水分通过改变土壤中氧气(O₂)、湿度与温度等,对自养型细菌的活动影响较大,从而影响农田 N₂O 的排放。当土壤含水量为田间持水量的 50%~60%时,硝化细菌活动最为旺盛,硝化作用进行最快。在水旱轮作生态系统中,土壤湿度在 77%~86%变化时,N₂O 的排放量达到峰值^[16]。因此,控制灌溉会减少 N₂O 的排放。王孟雪等^[17]研究了灌溉方式对东北寒地稻作的影响,认为稻田田面的水深是影响 N₂O 排放的重要因子。可能是水稻生长期降雨过多,使田间含水量过高,影响 N₂O 的排放,其中原因还需要进一步研究证明。实验室研究结果表明,节水灌溉能显著降低 CH₄ 排放量 38%,而 N₂O 排放量增加 34%,但全球变暖潜力(GWP)和温室气体强度(GHGI)分别显著下降 22%和 24%,同时提高水分利用效率 40%。而彭世彰等^[18]研究发现,控制灌溉能够降低 N₂O 排放的 GWP。其中控制灌溉下 CH₄ 和 N₂O 的 GWP 较淹水灌溉减少了 59.1%,这与邹建文等^[19]的研究结果是一致的,稻田 CH₄ 和 N₂O 的排放有着显著的消长关系。成臣等^[20]研究表明,与持续淹水处理相比,间歇灌溉处理全球增温潜势显著降低 38.2%~53.4%,温室气体排放强度显著降低 38.8%~54.6%,同时提高水稻产量。Hou 等^[21]通过田间试验发现,在传统灌溉(TI)和控制灌溉(CI)条件下,稻麦轮作系统 CH₄ 和 N₂O 排放之间存在显著的消长关系。水稻季节的 CI 对冬小麦季节 CH₄ 和 N₂O 排放量有明显的后续影响。在整个年度周期内,CI 显著降低,累积 CH₄ 排放量为 13.27 kg/hm²,比 TI 降低了 80.6%,但 N₂O 排放没有显著差异。CI 轮作系统 CH₄ 和 N₂O 在 100 年尺度上综合 GWP 为 2 720.35 kg/hm²,较 TI 处理降低 41.1%。此外,水稻和小麦的产量在 CI 和 TI 之间差异不显著。因此,在保证作物产量的同时,CI 可以显著减轻水稻—冬小麦轮作系统中 CH₄ 和 N₂O 造成的年综合温室效应。可见,灌溉模式是影响农田 CH₄ 和 N₂O 排放的重要因素。

2.2 施肥管理 氮肥的施用在提高作物产量和改善农产品质量中发挥着重要作用。施肥的方式、种类和数量会影响土壤性质如微生物群落、土壤碳氮比以及有机质含量从而影响 N₂O 的排放。研究表明,施用氮肥对农田土壤 N₂O 的排放有促进作用^[22]。

Fan 等^[23]研究了不同施氮水平对土壤相关微生物丰度和 N₂O 排放通量的影响,结果发现尿素显著增加了 N₂O 排放,在一定时间内改变了土壤中功能性微生物的组成,施氮肥明显减少了产甲烷菌 amoA 和 mcrA 的基因丰度。这可能是与土壤氧化还原电位(Eh)有关,有利于氨(NH₃)转化成 N₂O,促进了 N₂O 的排放,具体原因还需要进一步证实。目前,已有许多研究表明,N₂O 排放与施肥种类和数量密切相

关^[24]。李琳等^[25]对长期不同施肥类型的稻田 N₂O 排放速率进行研究,发现施用氮肥增加了 N₂O 的排放,且氮肥处理 N₂O 通量对温室效应影响较大,一般认为,与施肥类型及投入数量的多少密切相关,结果还有待于进一步研究。王旭燕等^[26]也得到了同样的结果,在对旱作农田土壤的长期施氮定位试验中,结果表明施氮水平显著影响 N₂O 气体的排放,且随着氮肥用量的增加,冬小麦土壤 N₂O 排放有增加的趋势。因此,设计合理的施氮控制水平对稻麦农田 N₂O 减排有着重要的意义。李平等^[27]研究表明氮肥配施猪粪较单施化肥能增加稻田 N₂O 的排放量。这可能是由于配施有机肥为土壤微生物的硝化与反硝化作用提供更多的反应基质,提高了 N₂O 的排放。但是 Liu 等^[28]研究发现用有机肥替代化肥可以显著降低 N₂O 的排放,随着施用牛粪提高土壤肥力,小麦和玉米产量也有所增加。有机肥完全替代化肥降低了温室气体的排放,可以将农业生态系统从碳源[2.7 t/(hm²·a)]转变为碳汇[-8.8 t/(hm²·a)]。因此,有机肥和化学肥料联合施用在改善土壤质量、作物产量以及减少温室气体排放方面有着良好的效果,为改善全球变化背景下的农业生态系统提供了理论依据。

2.3 水氮互作管理 水肥是影响稻麦轮作系统 N₂O 排放的重要调控因子,两者通过影响土壤湿度、土壤矿质氮含量以及微生物等,从而影响 N₂O 在土壤中扩散与还原速率。研究表明施氮会影响土壤硝化与反硝化过程,促进土壤 N₂O 的生成量。此外,水分状况在微生物活动中以及植物对氮肥的吸收利用中起到重要的作用,因此水氮互作共同制约着土壤 N₂O 的排放。

傅志强等^[29]在水氮互作模式对双季稻 CH₄ 和 N₂O 排放的研究中,发现追施氮肥促进 N₂O 的排放程度与灌溉方式密切相关。在相同的施氮水平下,间歇灌溉有利于减少 CH₄ 排放,但是促进了 N₂O 的排放,最终有利于气体增温潜势的降低,减少温室效应。在相同的灌溉条件下,N₂O 的排放在一定范围内随施氮量增加而增加。因此,间歇灌溉配施中氮有利于水稻种植。王孟雪^[30]研究发现,灌溉方式和氮肥投入对水稻生长季节 N₂O 排放平均通量和季节累积排放量具有一定的影响,同时两者具有交互作用。在同一灌溉方式下,水分利用率随着氮肥投入量的增大而升高,但当氮肥施肥量到一定水平后,水分利用率不再提高。灌溉模式对水稻氮肥利用率没有规律性的变化。另外,在相同灌溉的条件下,氮肥用量的增加促进土壤硝态氮含量的提高,影响土壤反硝化速率,对稻田 N₂O 排放影响较大;淹灌模式下,随着施肥量的增加,氮肥利用率逐渐降低,同时也增加了 N₂O 的温室效应。因此,要有效地降低 N₂O 的温室效应,不仅需要关注 N₂O 的排放机制,而且需要注重水肥这 2 个关键因子的协同效应。

3 N₂O 的减排措施

3.1 优化水分管理 水分管理措施不仅能给作物带来高产,而且能够有效减缓全球温室效应。研究发现实行控制灌溉、间歇灌溉和浅显灌溉等节水灌溉技术能够减少温室气体的排放^[31],且有利于节水保肥、容易实现自动化控制,在我

国东北和西部地区有着广泛的推行。彭世彰等^[32]在控制灌溉条件下,发现稻田 CH_4 排放量比淹水灌溉减少 73.2%~85.0%,水稻产量无明显差异。虽然 N_2O 的排放量增加了 10.6%,但是控制灌溉下对全球温室效应的贡献却减少了 59.1%。袁伟玲等^[33]也得到了同样的结果, N_2O 的排放量在间歇节水灌溉下比长期淹水灌溉高,但是能够显著降低 N_2O 的温室效应。其原因可能是在长期淹水灌溉条件下,虽然足够的水分能增加反硝化作用的速率,但是影响了 N_2O 的扩散与还原速率,从而减少了 N_2O 的排放量。

3.2 合理的施肥方式 施肥能够增加作物的产量、提高并保持土壤肥力水平,同时能够改善土壤水热状况、增加生理活性物质、促进微生物活动,从而影响 N_2O 的排放。选择科学合理的施肥方式能够有效缓解温室效应和推动农业可持续性发展。与单施化肥相比,有机无机肥配施能明显减少 N_2O 的排放^[34]。郭腾飞等^[35]研究表明,在稻麦轮作体系下,氮肥配施有机肥的温室气体排放强度与单施氮肥处理相比,降低明显并且增产效果最佳。同时,配施有机肥能够有效改善微生物栖息环境,提高稻田土壤微生物磷脂脂肪酸的含量以及增加细菌和真菌的比例进而促进 N_2O 的减排。杨丹等^[36]研究发现,适当调整氮磷钾肥的比例也能减少 N_2O 的排放,其中化肥减量配施鲜猪粪、猪粪堆肥处理的 N_2O 排放量分别降低了 7.09%、4.89%。

3.3 合理的农作制度 选择合理的农作制度能降低土壤温室气体的排放量。农作制度是在土壤通气状况、保水保肥状况以及土壤温度等方面影响土壤微生物的活性^[37],从而会对硝化和反硝化过程和 N_2O 的排放产生重要作用。江波等^[38]认为免耕、少耕及秸秆覆盖技术可以有效减少农田土壤 N_2O 的生成量。也有学者发现免耕能促进土壤 N_2O 的排放^[39]。甚至有结果表明耕作方式对 N_2O 排放无显著影响^[40]。赵力莹等^[41]在耕作措施对冬小麦农田温室气体排放的研究中,发现灌溉施肥后深松处理下农田 N_2O 的排放通量最高,翻耕处理和保持旋耕下 N_2O 排放量较低,与 Badagliacca 等^[42]的研究结果是相同的。这可能是由于深松后增大了土壤孔隙度,影响了土壤微生物活性和土壤温度,有利于硝化与反硝化作用进而影响 N_2O 的生成速率,使土壤排放 N_2O 量显著增加。采用保护性耕作措施不仅能够改善土壤的可耕性,锁住土壤水分,提高水分利用率,而且增加土壤有机质,有助于 N_2O 的减排。张岳芳等^[43]研究发现水旱轮作方式对稻季 N_2O 的排放有着显著影响。在水稻烤田期间 N_2O 排放增加,可能是含水条件影响耕层土壤微生物的生长环境,从而对下茬水稻生长季的 N_2O 排放产生影响。

4 展望

稻麦轮作农田作为一个重要的温室气体排放源,对全球变暖有很大的影响,为了农业可持续发展,需要对 N_2O 气体进行减排。目前国内外研究人员对稻田温室气体的排放及减排进行了广泛研究,但是对水氮互动与温室气体产生的研究为数不多。另外,农业源温室排放的研究大多集中在南方双季稻区,对于季节性干旱区的稻麦农田研究还相对较

少。下一步在研究水肥等多因素对稻麦轮作系统温室气体排放的影响上,加强对土壤微生物因素的研究,将土壤理化特性、土壤生物特性以及温室气体排放有机联系起来,并提出相应的减排措施。这将为发展低碳农业、减缓全球气候变暖提供新的思路。

参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis; Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [2] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报 [R]. 北京: 国家发展和改革委员会应对气候变化司, 2013: 70.
- [3] SAMPANPANISH P. The effects of the rice variety and type of fertilizer on the emission of greenhouse gases from rice paddy fields [J]. Res J Chem Environ, 2013, 17(4): 42-48.
- [4] 谭月臣, 诸葛玉平, 刘东雪, 等. 华北平原农田管理措施对冬小麦-夏玉米轮作系统 N_2O 和 CH_4 排放的影响 [J]. 环境科学学报, 2016, 36(7): 2638-2649.
- [5] SANCHEZ-MARTÍN L, MEIJIDE A, GARCIA-TORRES L, et al. Combination of drip irrigation and organic fertilizer for mitigating emissions of nitrogen oxides in semiarid climate [J]. Agriculture, ecosystems & environment, 2010, 137(1/2): 99-107.
- [6] 肖新, 朱伟, 杨露露, 等. 灌溉模式与施氮量对水稻需水规律及产量的影响 [J]. 南京农业大学学报, 2012, 35(4): 27-31.
- [7] XIAO X, ZHAO Y W, HU F. Comparison of the function of different water-saving rice cultivation systems in the seasonal-drought hilly region of southern China [J]. Journal of sustainable agriculture, 2008, 32(3): 463-482.
- [8] AZIZ O, HUSSAIN S, RIZWAN M, et al. Increasing water productivity, nitrogen economy, and grain yield of rice by water saving irrigation and fertilizer-N management [J]. Environmental science and pollution research, 2018, 25(17): 16601-16615.
- [9] 王玉英, 李晓欣, 董文旭, 等. 华北平原农田温室气体排放与减排综述 [J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(2): 167-174.
- [10] BRAKER G, CONRAD R. Chapter 2-diversity, structure, and size of N_2O -producing microbial communities in soils-what matters for their functioning? [J]. Advances in applied microbiology, 2011, 75: 33-70.
- [11] 孙志强, 江长胜, 郝庆菊. 农田土壤 N_2O 的产生机制及其影响因素研究进展 [J]. 土壤通报, 2010, 12(6): 1524-1530.
- [12] CANTO J D, VILBERT A C, LANCASTER K M. *Nitrosomonas europaea* cytochrome P460 is a direct link between nitrification and nitrous oxide emission [J]. Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America, 2016, 113(51): 14704-14709.
- [13] INOUE D, SAWADA K, TSUTSUI H, et al. Identification of microbial populations contributing to nitrification-associated nitrous oxide emission during cattle manure composting process with forced aeration [J]. Journal of material cycles and waste management, 2018, 20(1): 353-360.
- [14] HU N J, WANG B J, GU Z H, et al. Effects of different straw returning modes on greenhouse gas emissions and crop yields in rice-wheat rotation system [J]. Agriculture, ecosystems & environment, 2016, 223: 115-122.
- [15] 徐华, 邢光熹, 蔡祖聪, 等. 土壤水分状况和质地对稻田 N_2O 排放的影响 [J]. 土壤学报, 2000, 37(4): 499-505.
- [16] LIU S W, QIN Y M, ZOU J W, et al. Effects of water regime during rice-growing season on annual direct N_2O emission in a paddy rice - winter wheat rotation system in southeast China [J]. Science of the total environment, 2010, 408(4): 906-913.
- [17] 王孟雪, 张忠学, 吕纯波, 等. 不同灌溉模式下寒地稻田 CH_4 和 N_2O 排放及温室效应研究 [J]. 水土保持研究, 2016, 23(2): 95-100.
- [18] 彭世彰, 李道西, 缴锡云, 等. 节水灌溉模式下稻田甲烷排放的季节变化 [J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2006, 32(5): 546-550.
- [19] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 不同种类有机肥施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的综合影响 [J]. 环境科学, 2003, 24(4): 7-12.
- [20] 成臣, 杨秀霞, 汪建军, 等. 秸秆还田条件下灌溉方式对双季稻产量及农田温室气体排放的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(1): 186-195.
- [21] HOU H J, YANG S H, WANG F T, et al. Controlled irrigation mitigates the annual integrative global warming potential of methane and nitrous ox-

- ide from the rice-winter wheat rotation systems in Southeast China[J]. *Ecological engineering*, 2016, 86: 239–246.
- [22] 赵峰, 岳玉波, 张翼, 等. 不同施肥条件对稻田温室气体排放特征的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(11): 2273–2278.
- [23] FAN X F, YU H Y, WU Q Y, et al. Effects of fertilization on microbial abundance and emissions of greenhouse gases (CH₄ and N₂O) in rice paddy fields[J]. *Ecology & evolution*, 2016, 6(4): 1054–1063.
- [24] 董玉红, 欧阳竹, 李运生, 等. 肥料施用及环境因子对农田土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(5): 913–918.
- [25] 李琳, 张海林, 陈阜, 等. 不同耕作措施下冬小麦生长期农田二氧化碳排放通量及其与土壤温度的关系[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2765–2770.
- [26] 王旭燕, 张仁陟, 蔡立群, 等. 不同施氮处理下旱作农田土壤 CH₄、N₂O 气体排放特征研究[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(11): 3655–3661.
- [27] 李平, 郎漫, 李森, 等. 不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(5): 2360–2367.
- [28] LIU H T, LI J, LI X, et al. Mitigating greenhouse gas emissions through replacement of chemical fertilizer with organic manure in a temperate farmland[J]. *Science bulletin*, 2015, 60(6): 598–606.
- [29] 傅志强, 龙攀, 刘依依, 等. 水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. *环境科学*, 2015, 36(9): 3365–3372.
- [30] 王孟雪. 东北寒地稻作水氮互作的温室气体排放特征研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- [31] 杭玉浩, 王强盛, 许国春, 等. 水分管理和秸秆还田对稻麦轮作系统温室气体排放的综合效应[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(11): 1844–1855.
- [32] 彭世彰, 侯会静, 徐俊增, 等. 节水灌溉对稻田 N₂O 季节排放特征的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(8): 14–18.
- [33] 袁伟玲, 曹贵, 程建平, 等. 间歇灌溉模式下稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及温室效应评估[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(12): 4294–4300.
- [34] WANG J Y, CHEN Z Z, MA Y C, et al. Methane and nitrous oxide emissions as affected by organic-inorganic mixed fertilizer from a rice paddy in southeast China[J]. *Journal of soils and sediments*, 2013, 13(8): 1408–1417.
- [35] 郭腾飞, 梁国庆, 周卫, 等. 施肥对稻田温室气体排放及土壤养分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(2): 337–345.
- [36] 杨丹, 叶祝弘, 肖珣, 等. 化肥减量配施有机肥对早稻田温室气体排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(11): 2443–2450.
- [37] 闫翠萍, 张玉铭, 胡春胜, 等. 不同耕作措施下小麦—玉米轮作农田温室气体交换及其综合增温潜势[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(6): 704–715.
- [38] 江波, 杨书运, 马友华, 等. 耕作方式对圩区冬小麦温室气体排放通量的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2014, 41(2): 241–247.
- [39] 陈晓龙, 杨威, 江波, 等. 不同耕作方式下冬小麦田 N₂O 排放特征的差异性研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(3): 221–227.
- [40] 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等. 耕作方式和稻草还田对双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(11): 216–224.
- [41] 赵力莹, 董文旭, 胡春胜, 等. 耕作方式转变对冬小麦季农田温室气体排放和产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(11): 1613–1623.
- [42] BADAGLIACCA G, BENÍTEZ E, AMATO G, et al. Long-term effects of contrasting tillage on soil organic carbon, nitrous oxide and ammonia emissions in a Mediterranean Vertisol under different crop sequences[J]. *Science of the total environment*, 2018, 619/620: 18–27.
- [43] 张岳芳, 周炜, 陈留根, 等. 太湖地区不同水旱轮作方式下稻季甲烷和氧化亚氮排放研究[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(3): 290–296.
- 220.
- [60] BRADFORD M A, DAVIES C A, FREY S D, et al. Thermal adaptation of soil microbial respiration to elevated temperature[J]. *Ecology letters*, 2010, 11(12): 1316–1327.
- [61] PETTERSSON M, BÅÅTH E. Temperature-dependent changes in the soil bacterial community in limed and unlimed soil[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2003, 45(1): 13–21.
- [62] 郑海峰, 陈亚梅, 杨林, 等. 高山林线土壤微生物群落结构对模拟增温的响应[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(9): 2840–2848.
- [63] RINNAN R, MICHELSEN A, BÅÅTH E, et al. Mineralization and carbon turnover in subarctic heath soil as affected by warming and additional litter[J]. *Soil biology & biochemistry*, 2007, 39(12): 3014–3023.
- [64] RINNAN R, MICHELSEN A, BÅÅTH E, et al. Fifteen years of climate change manipulations alter soil microbial communities in a subarctic heath ecosystem[J]. *Global change biology*, 2010, 13(1): 28–39.
- [65] VAN MEETEREN M J M, TIETEMA A, VAN LOON E E, et al. Microbial dynamics and litter decomposition under a changed climate in a dutch heathland[J]. *Applied soil ecology*, 2008, 38(2): 119–127.
- [66] INUBUSHI K, CHENG W, MIZUNO T, et al. Microbial biomass carbon and methane oxidation influenced by rice cultivars and elevated CO₂ in a Japanese paddy soil[J]. *European journal of soil science*, 2011, 62(1): 69–73.
- [67] GUTKNECHT J L M. Exploring long-term microbial responses to simulated global change[D]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 2007.
- [68] RINNAN R, STARK S, TOLVANEN A. Responses of vegetation and soil microbial communities to warming and simulated herbivory in a subarctic heath[J]. *Journal of ecology*, 2009, 97(4): 788–800.
- [69] SCHIMMEL J, BALSER T C, WALLENSTEIN M. Microbial stress-response physiology and its implications for ecosystem function[J]. *Ecology*, 2007, 88(6): 1386–1394.
- [70] HYVÖNEN R, ÅGREN G I, DALIAS P. Analysing temperature response of decomposition of organic matter[J]. *Global change biology*, 2010, 11(5): 770–778.

(上接第 27 页)

- [48] CUSACK D F, SILVER W L, TORN M S, et al. Changes in microbial community characteristics and soil organic matter with nitrogen additions in two tropical forests[J]. *Ecology*, 2011, 92(3): 621–632.
- [49] 袁颖江, 樊后保, 王强, 等. 模拟氮沉降对杉木人工林土壤有效养分的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2007, 24(4): 437–444.
- [50] 刘蔚秋, 刘滨扬, 王江, 等. 不同环境条件下土壤微生物对模拟大气氮沉降的响应[J]. *生态学报*, 2010, 30(7): 1691–1698.
- [51] 赵超, 张文文, 徐长柏, 等. 模拟氮沉降对杨树人工林土壤微生物群落结构的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(2): 360–366.
- [52] FREY S D, KNORR M, PARRENT J L, et al. Chronic nitrogen enrichment affects the structure and function of the soil microbial community in temperate hardwood and pine forests[J]. *Forest ecology & management*, 2004, 196(1): 159–171.
- [53] 刘爽, 王传宽. 五种温带森林土壤微生物生物量碳氮的时空格局[J]. *生态学报*, 2010, 30(12): 3135–3143.
- [54] 刘纯, 刘延坤, 金光泽. 小兴安岭 6 种森林类型土壤微生物量的季节变化特征[J]. *生态学报*, 2014, 34(2): 451–459.
- [55] EDWARDS K A, MCCULLOCH J, KERSHAW G P, et al. Soil microbial and nutrient dynamics in a wet Arctic sedge meadow in late winter and early spring[J]. *Soil biology & biochemistry*, 2010, 38(9): 2843–2851.
- [56] EDWARDS K A, JEFFERIES R L. Inter-annual and seasonal dynamics of soil microbial biomass and nutrients in wet and dry low-Arctic sedge meadows[J]. *Soil biology & biochemistry*, 2013, 57(3): 83–90.
- [57] ALLISON S D, VITOUSEK P M. Extracellular enzyme activities and carbon chemistry as drivers of tropical plant litter decomposition[J]. *Biotropica*, 2010, 36(3): 285–296.
- [58] DESLIPPE J R, HARTMANN M, SIMARD S W, et al. Long-term warming alters the composition of arctic soil microbial communities[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2012, 82(2): 303–315.
- [59] RINNAN R, MICHELSEN A, BÅÅTH E. Long-term warming of a subarctic heath decreases soil bacterial community growth but has no effects on its temperature adaptation[J]. *Applied soil ecology*, 2011, 47(3): 217–