

农田土壤 N₂O 和 NO 排放的影响因素及其作用机制^①

蔡延江^{1,2}, 丁维新^{1*}, 项 剑¹

(1 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;

2 山地表生过程与生态调控重点实验室 (中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所), 成都 610041)

摘 要: 农田土壤作为 N₂O 和 NO 的重要排放源而备受关注。硝化和反硝化是土壤 N₂O 和 NO 产生的两个主要微生物过程, 环境因子和农田管理措施等因素强烈影响着这两个过程以及 N₂O 和 NO 的排放。本文重点论述了土壤水热状况、土壤质地、pH、肥料施用、耕作措施变更等关键性影响因素对农田土壤 N₂O 和 NO 排放的影响及其影响机制。

关键词: 氧化亚氮; 一氧化氮; 冻融; 减排; 土壤-作物体系

中图分类号: X142; X131.3

全球变暖已是不争的事实, 通常认为大气中温室气体浓度升高是导致全球变暖的主要原因。工业革命以来, 大气中 CO₂、CH₄ 和 N₂O 浓度呈持续上升的态势, 目前已分别达到 379 μl/L、1 774 nl/L 和 319 nl/L。虽然大气中 N₂O 浓度相对较低, 但其百年尺度的增温潜势却是 CO₂ 的 298 倍和 CH₄ 的 12 倍^[1]。N₂O 直接产生温室效应, 而另一种含氮气体 NO 却能在对流层通过光化学反应产生 O₃ 间接地产生温室效应。此外, N₂O 还可对平流层的臭氧产生破坏作用, 对流层中 NO 的一系列光化学反应是酸沉降中 HNO₃ 的生成源, 因此, 这两种含氮气体的浓度变化及其影响备受关注, 减少或有效控制其排放对缓解全球变化、改善人类生存环境意义重大。

农田土壤是 N₂O 和 NO 重要排放源, 基于全球农田土壤 1 008 个 N₂O 和 189 个 NO 排放数据分析, Stehfest 和 Bouwman^[2]指出, 施肥农田土壤每年释放 N₂O-N 和 NO-N 的量分别达到 3.3 和 1.4 Tg。为了满足日益增长的人口对粮食的需求, 越来越多肥料被施入农田以提高粮食产量, 这将极大地促进农田土壤 N₂O 和 NO 的排放^[2-3]。一般认为, 我国氮肥用量约占全球用量的 30% 以上, 因而研究我国农田土壤 N₂O 和 NO 排放规律及减排措施十分必要。硝化和反硝化是土壤 N₂O 和 NO 的主要产生过程, 众多对农田土壤 N₂O 和 NO 排放的研究也主要涉及这两个过程。环境因素和农田管理措施 (如土壤温度、湿度、pH、施肥、耕作等)

强烈影响着这两个过程及 N₂O 和 NO 的排放^[4-6]。通过对农田土壤 N₂O 和 NO 排放影响因素及其作用机制的探讨, 有利于更深入了解农田土壤氮素转化过程, 为合理施用氮肥和减少农田 N₂O 和 NO 排放提供依据。

1 水热状况对 N₂O 和 NO 排放的影响

气温的季节性变化决定土壤温度的季节性变化, 降水的多寡则在一定程度上影响着土壤的水分含量。温度和降水除影响 N₂O 和 NO 产生的生物学过程外, 还强烈影响着土壤 N₂O 和 NO 的传输过程。因而气候条件的变化强烈影响着土壤 N₂O 和 NO 的季节性排放^[7-8]。

1.1 温度对 N₂O 和 NO 排放的影响

土壤温度影响微生物的代谢活动及 N₂O 和 NO 的产生过程。在一定温度范围内, 土壤微生物的活性以及 N₂O、NO 的排放速率通常随土壤温度升高而增加。一般认为, 硝化和反硝化作用的最适温度范围分别为 25℃ ~ 35℃ 和 30℃ ~ 67℃^[9]。低温可显著降低土壤的硝化速率, 但并不明显减弱反硝化速率^[10]。较低温度下反硝化速率虽然很低, 但即使在 0℃ ~ 5℃ 仍能发生反硝化作用, 而且还伴有一定量的 N₂O 和 NO 产生^[11]。NO/N₂O 排放量的比值可以作为判断潜在的主导微生物过程, 一般而言, 比值大于 1 表示 N₂O 和 NO 主要由硝化作用产生, 相反则主要由反硝化作用产生。NO/N₂O 的比值通常随着温度的降低而降低, 表明较低

①基金项目: 国家自然科学基金项目 (40971134) 和中国科学院知识创新重要方向性项目 (KZCX2-YW-439) 资助。

* 通讯作者 (wxding@issas.ac.cn)

作者简介: 蔡延江 (1983—), 男, 江苏泗阳人, 博士研究生, 主要从事农田土壤碳氮循环的研究。E-mail: yanjiangcai@163.com

温度下土壤排放 N_2O 主要来自于反硝化^[12]。温度升高时硝化和反硝化微生物的活性都会有所增加,但反硝化对温度上升的敏感度更高^[13]。硝化过程对土壤 N_2O 排放的贡献随着温度的增加而降低,而反硝化过程的贡献量则随着温度的增加而增加^[16]。这主要是因为温度升高促进土壤呼吸,降低土壤 O_2 含量,并促进厌氧微域的形成,进而增强土壤的反硝化能力^[13]。随着反硝化强度的增大,反硝化产物中 $\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$ 的比值会随着温度的增加而减少。

在一定温度范围内,NO 排放速率随着温度的增加而增大,而且 NO 排放的日变化与温度的变化密切相关^[4]。不过, Barnard 等^[5]指出,温度升高并不会对田间土壤 N_2O 排放产生大的直接影响,但在水分或底物不是限制因子时,温度升高则能极大地促进土壤 N_2O 的排放^[15]。然而,温度升高对农田土壤 N_2O 排放的促进效应会在一定程度上因随之而来的土壤含水量下降带来的抑制效应而减弱^[16]。过高的土壤温度以及较低的土壤含水量都会降低土壤微生物的活性^[17]。

综上所述,温度变化较为复杂地影响着土壤的硝化和反硝化过程以及 N_2O 和 NO 排放,研究中应综合考虑温度与其他控制因子的交互效应。农田土壤中人为扰动因素(施肥、灌水等)较多,因而在气候变暖的大环境下研究温度提升对农田土壤 N_2O 和 NO 的排放具有重要意义。

1.2 水分对 N_2O 和 NO 排放的影响

土壤含水量影响土壤通气性、氧化还原电位、土壤有效氮(NH_4^+ 、 NO_3^- 等)分布及其对微生物的有效性等,从而对土壤硝化、反硝化等微生物过程以及 N_2O 和 NO 排放产生影响。此外,水分状况还影响着 N_2O 和 NO 在土壤中的传输及其向大气的扩散。一般而言,土壤水分的增加会导致土壤通气性变差, O_2 含量越来越少,从而促进反硝化作用并减弱硝化作用^[18]。Granli 和 Bockman^[9]指出,耕作土壤中的 N_2O 排放在 70% ~ 90% 土壤充水空隙度(water-filled pore space, WFPS)时主要是由反硝化过程产生的,30% ~ 70% WFPS 时则主要由硝化过程产生。通气条件好的土壤有利于硝化作用和 NO 排放,而大量的 N_2O 排放主要出现在利于反硝化的高含水量土壤中,因而,通常认为,最适宜 NO 和 N_2O 排放的土壤含水量范围分别为 30% ~ 60% 和 60% ~ 80% WFPS^[19]。与 N_2O 相比,NO 更易通过反硝化作用被进一步还原,因此 NO 的产生和排放对土壤水分含量增加更为敏感^[20],NO/ N_2O 比值通常随着土壤含水量的增加而降低。

降水和灌水都会改变土壤湿度,从而影响 N_2O 和

NO 的产生和排放。当 NO_3^- 不是限制因子时,降水通常能引起土壤 N_2O 的大量排放^[21]。一般而言,土壤 N_2O 排放会随着降水(灌水)后水分含量的增加而增大,但 NO 的排放则会有所减少^[7]。不过当土壤比较干燥时,降水(灌水)则能同时促进土壤 N_2O 和 NO 的排放,这种现象与首次水分增加情况下土壤微生物的“激发效应”引起硝化和反硝化作用增强有关^[22]。但过多降水(灌水)致使土壤含水量增大到较高水平时,反硝化作用虽然进一步加强,但由于土壤通气性变差,生成的 NO 和 N_2O 向大气的扩散受到严重阻碍,使其有足够的时间被进一步还原为 N_2 。再者,不同灌溉方式对土壤 N_2O 和 NO 的排放也产生着不同的影响。Sánchez-Martín 等^[23]研究发现,与沟灌相比,滴灌显著降低了土壤 N_2O 和 NO 的排放,降幅分别为 70% 和 33%。因而在研究降水或灌水对土壤 N_2O 和 NO 排放影响时,应综合考虑降水(灌水)量的多寡、降水(灌水)前的土壤水分状况以及灌溉方式等因素。

1.3 冻融对 N_2O 和 NO 排放的影响

冬春之际的冻融现象可导致短期的 N_2O 排放高峰。冻结温度、冻结时间、冻融次数和冻结前的土壤水分均影响结冻期土壤微生物活性及种群结构。较温和的冻融对土壤微生物量碳氮影响不大,但强烈的冻融循环会影响土壤溶液中有机碳和氮的数量和形态^[24]。冻融作用不仅破坏土壤团聚体结构并能释放有效养分,而且还可促进土壤微生物活动、改变土壤微生物群落和结构,促使土壤 N_2O 排放增加,从而致使冻融区土壤成为 N_2O 排放的一个重要源^[25-26]。冻融促进了土壤 N_2O 排放,但由于冻融条件下土壤温度较低、含水量较高、通气性较差,NO 排放量通常较少。Koponen 等^[12]研究发现,融化明显增加了有机土壤 N_2O 排放,但并未增加土壤 NO 排放。以往在我国农田土壤 N_2O 排放的研究中,通常关注的是作物生长季节,而忽视了冻融期土壤 N_2O 的排放。在内蒙古的禁牧草原上,冻融期土壤的 N_2O 排放量占全年总排放量的 66% ~ 81%^[27],这表明冻融交替对季节性冻土 N_2O 排放的影响是不容忽视的。因而,在今后的研究中需要加强冻融对北方地区土壤 N_2O 排放影响研究,田间预测模型中也需要加入相关的校正因子。

2 土壤质地和 pH 对 N_2O 和 NO 排放的影响

土壤质地影响土壤的通透性、水分含量以及氧化还原电位,因而影响土壤硝化作用和反硝化作用以及 N_2O 和 NO 排放。与粗质地土壤相比,细质地土壤因为较低的充气孔隙率以及较大的 O_2 扩散阻力而具有

较低的氧化还原电位^[28]，因此细质地土壤具有更高的 N₂O 产生潜力。众多田间实际测定以及模型模拟结果表明，细质地土壤 N₂O 平均排放量高于粗质地土壤^[3, 29]。另一方面，细质地土壤较高的反硝化强度也可能促使 N₂O 被进一步还原为 N₂ 而减少其排放。在种植小麦和棉花的 3 种不同质地土壤上，徐华等^[30]研究发现，N₂O 排放强度依次为壤土>砂土>黏土。杨云等^[31]还发现菜地 N₂O 排放与土壤黏粒含量呈显著负相关，与砂粒含量呈显著正相关。一般认为，排水不畅的细质地土壤倾向于排放大量的 N₂O，而排放良好的粗质地土壤则有利于 NO 大量排放^[3]。人为压实可通过影响土壤体积质量、通气性以及水分含量等来改变土壤的碳氮转化过程。压实提升了土壤的反硝化潜势，从而使得压实土壤 N₂O 排放量常常高于未压实土壤^[32]。当今，农业机械化越来越普及，机械压实对农田土壤 N₂O 和 NO 排放的影响也需要在研究中加以考虑。

土壤 pH 值是农田土壤 N₂O 和 NO 排放过程中一个重要而复杂的影响因素，它通过直接或间接影响参与氮素转化过程的微生物活动以及不同作用阶段的酶活性来影响土壤 N₂O 和 NO 排放。Remde 和 Conrad^[33]的室内研究发现，碱性土壤 (pH=7.8) 中 NO 的排放主要来自硝化作用，而生物反硝化作用则是酸性土壤 (pH=4.7) 中 NO 主要产生过程。不过，一般认为，低 pH 情况下，化学反硝化对土壤 NO 的排放也有一定贡献^[34]。低 pH 能抑制 N₂O 还原酶的活性，因而在低 pH 环境下，N₂O 还原为 N₂ 的量减少，反硝化产物中 N₂O 的比例较高^[11]。长期施肥导致中国农田土壤酸化已是一个不争的事实^[35]，在这种情势下，农田土壤 N₂O 和 NO 排放与以往相比是否会增加还有待进一步研究。

3 肥料对 N₂O 和 NO 排放的影响

肥料用量、类型、施肥方式以及施肥时间都会影响土壤 N₂O 和 NO 排放。土壤 N₂O 和 NO 排放量一般随着氮肥用量增加而增大。肥料氮转化为 N₂O 和 NO 的平均排放系数分别为 0.9% 和 0.7%^[34]。缓释肥料施用可降低土壤 N₂O 和 NO 的排放。与普通碳酸氢铵和尿素相比，施用长效碳酸氢铵可以明显延后 N₂O 排放高峰期的出现时间，而且大多数情况下可以显著减少 N₂O 的释放量^[36]。Hadi 等^[37]对印度尼西亚黏土的研究也发现，与尿素相比，施用包膜肥料可降低 N₂O 排放量的 92%。有机肥和化肥对 N₂O 和 NO 排放的影响结果也不尽一致^[38]。土壤反硝化的活性与活性有机碳含量密切相关，外源有机碳的加入可促进反硝化作用。不过过于充足的碳源以及完全的厌氧环境却会导致

N₂O 被进一步还原为 N₂ 或发生硝态氮还原成铵作用而有利于气态产物 N₂O 和 NO 的生成^[11]。有机肥和氮肥对土壤 N₂O 排放影响的差异主要归因于有机肥施加对土壤反硝化程度影响的不同。有些研究者认为，化学肥料处理比有机肥处理释放更多的 N₂O^[39-40]，也有研究者指出，有机肥能促进土壤排放更多的 N₂O^[8, 41]。不过，由于有机肥的施加提升了土壤的反硝化能力，NO 被进一步还原为 N₂O 的潜力增大，因而有机肥处理土壤的 NO 排放量一般比化肥处理的低^[8, 41]。

脲酶抑制剂（如 N-丁基硫代磷酰三胺、氢醌等）和肥料中添加的硝化抑制剂（双氢胺、吡啶、乙炔等）均可抑制土壤 N₂O 和 NO 的排放，且尤以硝化抑制剂 + 脲酶抑制剂结合使用的效果更为明显^[42-43]。然而，脲酶和硝化抑制剂对土壤 N₂O 和 NO 排放的影响因土壤含水量的不同而不同，土壤含水量低时抑制效果明显，而含水量高时则无明显的抑制效果^[44]。分期分批施用氮肥也可影响土壤 N₂O 和 NO 排放，当施肥时间与作物吸收养分的时间同步时，作物对肥料氮的吸收利用效率更高，因此，分批施肥与单次施肥相比，一般可以减少土壤 N₂O 和 NO 排放^[3]。

施肥位置的不同也影响土壤 N₂O 和 NO 排放。肥料深施由于土壤的相对缺氧环境利于反硝化的进行而通常比肥料浅施或面施排放更多的 N₂O 和更少的 NO^[3]。在加拿大黏壤土上，Drury 等^[45]研究发现，氮肥深施（深 10 cm）比氮肥浅施（深 2 cm）增加了 35% 的 N₂O 排放。与此相反，Liu 等^[46]在美国细壤土上研究发现，与氮肥浅施（深 0、5 cm）相比，氮肥深施（深 10、15 cm）分别降低了 41% ~ 69% 的 N₂O 和 36% ~ 81% 的 NO 排放，他们认为这是因为氮肥深施降低土壤的硝化速率和延迟土壤反硝化作用的发生所致。Hou 等^[47]在研究中还发现，氮肥深施能有效降低日本火山灰土 NO 排放，但对 N₂O 排放的影响较小。综上分析，较深层次肥料微域产生的 NO 在扩散至表面土壤过程中极易被消耗，但对 N₂O 的影响却可能随着土壤质地、施肥深度等因素影响硝化和反硝化结果以及扩散效果的不同而不同。

4 土壤-作物体系对 N₂O 和 NO 排放的影响

作物对土壤 N₂O 和 NO 排放的影响是一个复杂的过程。一方面，作物通过根系吸收与硝化反硝化过程竞争利用土壤有效氮，可能减少 N₂O 和 NO 排放^[48]；另一方面，作物根系分泌物和残留物的降解为土壤微生物（尤其是根际微生物）提供碳源和能源以及消耗土壤空气中的 O₂，从而有利于反硝化作用发生以及

N_2O 产生^[3,49]；此外，某些作物的气孔组织还可以加速 N_2O 和 NO 从土壤向大气扩散^[42]。与非豆科作物相比，种植具有固氮功能的豆科作物通常可能会促进土壤 N_2O 排放，但作物种类对土壤 NO 排放无显著影响^[2-3]。还有研究发现，种植玉米土壤 N_2O 排放量高于豆科作物^[50]，这可能与作物根系分泌物影响效果的不同有关。Philippot 等^[51]发现，种植玉米的根际土壤硝酸盐还原酶活性是非根际土壤的 2~3 倍，并且根际效应的存在还可能降低反硝化发生时土壤水分含量阈值。

作物地上部分也可以产生、排放 N_2O 和 NO ，Klepper^[52]最早发现了除草剂处理过的大豆幼苗可以排放 NO 。陈冠雄等^[53]则首次报道了植物能释放 N_2O 的现象，但长期以来，关于作物地上部分 N_2O 和 NO 排放一直被忽视^[54]，而且由于其排放机理还不太明确以及测定方法的欠缺，关于作物地上部分 N_2O 和 NO 排放的研究仍相对较少。

耕作破坏了土壤的团聚体结构，同时改善土壤孔隙性、温度和水分条件，促进有机质矿化^[55]。免耕则可降低土壤侵蚀、提高土壤团聚性以及蓄供水分的能力，同时还可增加土壤有机碳含量^[56-57]，因而免耕常作为低碳农业开展中的一个重要措施而被广泛应用^[58]。免耕在有效分馏大气碳的同时还影响着土壤 N_2O 和 NO 的排放，但是，迄今为止，国际上有关免耕对 N_2O 和 NO 排放影响的研究结果却不尽一致。Chatskikh 和 Olesen^[59]发现，与常规耕作相比，免耕显著降低土壤 N_2O 排放。与此相反，Ball 等^[60]却发现免耕土壤的 N_2O 排放量高于常规耕作。此外，还有研究者发现不同耕作措施间 N_2O 排放量相近^[20]。与 N_2O 相比，有关免耕对土壤 NO 排放影响的研究还比较少。在玉米-大豆轮作的美国粉砂壤土上，Venterea 等^[61]发现，施尿素时常规耕作土壤 NO 排放量略高于免耕处理，但并不存在显著差异。而在玉米连作的美国黏壤土上，Liu 等^[20]发现免耕显著降低了土壤 NO 的排放。免耕通过影响土壤的硝化和反硝化强度以及气体在土壤中的扩散速率来影响 N_2O 和 NO 的排放^[20, 59, 61]。不过，免耕对硝化和反硝化的影响程度还与土壤质地、气候区域、其他田间管理措施等多个因素相关，这需要在未来研究中进一步明确它们之间的相关关系。

5 结语

土壤产生、排放 N_2O 和 NO 的过程是陆地生态系统氮素循环的一个重要环节，是土壤向大气输出活性氮的重要方式。 N_2O 和 NO 在平流层和对流层中一系列的大气化学反应引起的诸多环境问题对整个地球生

态系统产生深远的影响。农田土壤生态系统是大气 N_2O 和 NO 的重要排放源，了解各影响因素对 N_2O 和 NO 产生和排放的影响程度和作用机制对寻求切实可行的减排措施至关重要。

温度升高一方面提高了土壤硝化和反硝化微生物的活性，一方面又通过增加蒸发量而降低土壤水分含量，在全球变暖的环境下是否北方半干旱地区 NO 排放会增多而南方湿润地区 N_2O 排放量会增大？在施肥情况下这种现象是否会加剧？尚有待进一步的研究。水分管理和氮肥施用是最为频繁应用于田间的人为调控因子，因而，甄选肥料种类和优化施肥时间、施肥量、施肥位置以及完善水肥耦合措施仍旧是需要重点考虑的问题。只有深入了解不同影响因素之间的相互关系及其对 N_2O 和 NO 产生和排放的影响机制，才能合理地调控 N_2O 和 NO 的产生和排放，从而实现最大限度的减排，这对缓解全球变化和改善生态环境意义重大。

参考文献:

- [1] IPCC. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing // Solomon S, Qin D, Manning M. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom/New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2007
- [2] Stehfest E, Bouwman L. N_2O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: Summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 74(3): 207-228
- [3] Bouwman AF, Boumans LJM, Batjes NH. Emissions of N_2O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(4): 1 058
- [4] Ludwig J, Meixner FX, Vogel B, Forstner J. Soil-air exchange of nitric oxide: An overview of processes, environmental factors, and modeling studies. *Biogeochemistry*, 2001, 52(3): 225-257
- [5] Barnard R, Leadley PW, Hungate BA. Global change, nitrification, and denitrification: A review. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(1): GB1007, doi:10.1029/2004GB002282
- [6] Rochette P. No-till only increases N_2O emissions in poorly-aerated soils. *Soil and Tillage Research*, 2008, 101(1/2): 97-100
- [7] Yamulki S, Goulding KWT, Webster CP, Harrison RM. Studies on NO and N_2O fluxes from a wheat field. *Atmospheric Environment*, 1995, 29(14): 1 627-1 635
- [8] Hayakawa A, Akiyama H, Sudo S, Yagi K. N_2O and NO

- emissions from an Andisol field as influenced by pelleted poultry manure. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(3): 521–529
- [9] Granli T, Bockman OC. Nitrous oxide from agriculture. *Norwegian Journal of Agricultural Sciences*, 1994, 12 (Supplement): 1–128
- [10] Malhi SS, McGill WB, Nyborg M. Nitrate losses in soils: Effect of temperature, moisture and substrate concentration. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22(6): 733–737
- [11] Knowles R. Denitrification. *Microbiological Reviews*, 1982, 46(1): 43–70
- [12] Koponen HT, Duran CE, Maljanen M, Hytonen J, Martikainen PJ. Temperature responses of NO and N₂O emissions from boreal organic soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(7): 1779–1787
- [13] Castaldi S. Responses of nitrous oxide, dinitrogen and carbon dioxide production and oxygen consumption to temperature in forest and agricultural light-textured soils determined by model experiment. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 32(1): 67–72
- [14] Maag M, Vinther FP. Nitrous oxide emission by nitrification and denitrification in different soil types and at different soil moisture contents and temperatures. *Applied Soil Ecology*, 1996, 4(1): 5–14
- [15] Dobbie KE, Smith KA. The effects of temperature, water-filled pore space and land use on N₂O emissions from an imperfectly drained gleysol. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52(4): 667–673
- [16] Kamp T, Steindl H, Hantschel RE, Beese F, Munch JC. Nitrous oxide emissions from a fallow and wheat field as affected by increased soil temperatures. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 27(3): 307–314
- [17] Hoyle FC, Murphy DV, Fillery IRP. Temperature and stubble management influence microbial CO₂-C evolution and gross N transformation rates. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(1): 71–80
- [18] 李香兰, 徐华, 蔡祖聪. 水分管理影响稻田氧化亚氮排放研究进展. *土壤*, 2009, 41(1): 1–7
- [19] Davidson EA. Fluxes of nitrous oxide and nitric oxide from terrestrial ecosystems // Rogers JE, Whitman WB. *Microbial Production and Consumption of Greenhouse Gases: Methane, Nitrogen Oxides, and Halomethanes*. Washington, DC: American Society for Microbiology, 1991: 219–235
- [20] Liu XJ, Mosier AR, Halvorson AD, Zhang FS. Tillage and nitrogen application effects on nitrous and nitric oxide emissions from irrigated corn fields. *Plant and Soil*, 2005, 276(1/2): 235–249
- [21] Dobbie KE, Smith KA. Nitrous oxide emission factors for agricultural soils in Great Britain: The impact of soil water-filled pore space and other controlling variables. *Global Change Biology*, 2003, 9(2): 204–218
- [22] Dick J, Skiba U, Wilson J. The effect of rainfall on NO and N₂O emissions from Ugandan agroforest soils. *Phyton-Annales Rei Botanicae*, 2001, 41(3): 73–80
- [23] Sánchez-Martín L, Arce A, Benito A, Garcia-Torres L, Vallejo A. Influence of drip and furrow irrigation systems on nitrogen oxide emissions from a horticultural crop. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(7): 1698–1706
- [24] Grogan P, Michelsen A, Ambus P, Jonasson S. Freeze-thaw regime effects on carbon and nitrogen dynamics in sub-arctic heath tundra mesocosms. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(4): 641–654
- [25] 王连峰, 蔡延江, 张喜林, 解宏图. 冻融作用下土壤物理和微生物性状变化与氧化亚氮排放关系. *应用生态学报*, 2007, 18(10): 2361–2366
- [26] 杨红露, 秦纪洪, 孙辉. 冻融交替对土壤 CO₂ 及 N₂O 释放效应的研究进展. *土壤*, 2010, 42(4): 519–525
- [27] Wolf B, Zheng XH, Brueggemann N, Chen WW, Dannenmann M, Han XG, Sutton MA, Wu HH, Yao ZS, Butterbach-Bahl K. Grazing-induced reduction of natural nitrous oxide release from continental steppe. *Nature*, 2010, 464: 881–884
- [28] Rochette P, Angers DA, Chantigny MH, Gagnon B, Bertrand N. N₂O fluxes in soils of contrasting textures fertilized with liquid and solid dairy cattle manures. *Canadian Journal of Soil Science*, 2008, 88(2): 175–187
- [29] Bouwman AF, Boumans LJM, Batjes NH. Modeling global annual N₂O and NO emissions from fertilized fields. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(4): 1080
- [30] 徐华, 邢光熹, 蔡祖聪, 鹤田治雄. 土壤质地对小麦和棉花田 N₂O 排放的影响. *农业环境保护*, 2000, 19(1): 1–3
- [31] 杨云, 黄耀, 姜纪峰. 土壤理化特性对冬季菜地 N₂O 排放的影响. *农村生态环境*, 2005, 21(2): 7–12
- [32] Beare MH, Gregorich EG, St-Georges P. Compaction effects on CO₂ and N₂O production during drying and rewetting of soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(3): 611–621
- [33] Remde A, Conrad R. Role of nitrification and denitrification for NO metabolism in soil. *Biogeochemistry*, 1991, 12(3): 189–205
- [34] Yamulki S, Harrison RM, Goulding KWT, Webster CP. N₂O, NO and NO₂ fluxes from a grassland: Effect of soil pH. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, 29(8): 1199–1208
- [35] Guo JH, Liu XJ, Zhang Y, Shen JL, Han WX, Zhang WF, Christie P, Goulding KWT, Vitousek PM, Zhang FS. Significant

- acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, 327: 1 008-1 010
- [36] 侯爱新, 陈冠雄. 不同种类氮肥对土壤释放 N_2O 的影响. *应用生态学报*, 1998, 9(2): 176-180
- [37] Hadi A, Jumadi O, Inubushi K, Yagi K. Mitigation options for N_2O emission from a corn field in Kalimantan, Indonesia. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2008, 54(4): 644-649
- [38] 李晓, 颜晓元, 邢光熹, 熊正琴, 史陶钧, 沈光裕, 曾晓春. 不同动物排泄物氮的作物利用及对 N_2O 排放的贡献. *土壤*, 2008, 40(4): 548-553
- [39] Lopez-Fernandez S, Diez JA, Hernaiz P, Arce A, Garcia-Torres L, Vallejo A. Effects of fertiliser type and the presence or absence of plants on nitrous oxide emissions from irrigated soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 78(3): 279-289
- [40] Dick J, Kaya B, Soutoura M, Skiba U, Smith R, Niang A, Tabo R. The contribution of agricultural practices to nitrous oxide emissions in semi-arid Mali. *Soil Use and Management*, 2008, 24(3): 292-301
- [41] Akiyama H, Tsuruta H. Nitrous oxide, nitric oxide, and nitrogen dioxide fluxes from soils after manure and urea application. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32(2): 423-431
- [42] 黄树辉, 吕军. 农田土壤 N_2O 排放研究进展. *土壤通报*, 2004, 35(4): 516-522
- [43] Ding WX, Yu HY, Cai ZC. Impact of urease and nitrification inhibitors on nitrous oxide emissions from fluvo-aquic soil in the North China Plain. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(1): 91-99
- [44] Menendez S, Merino R, Pinto M, Gonzalez-Murua C, Estavillo JM. Effect of N-(n-butyl) thiophosphoric triamide and 3,4 dimethylpyrazole phosphate on gaseous emissions from grasslands under different soil water contents. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38(1): 27-35
- [45] Drury CF, Reynolds WD, Tan CS, Welacky TW, Calder W, McLaughlin NB. Emissions of nitrous oxide and carbon dioxide: Influence of tillage type and nitrogen placement depth. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(2): 570-581
- [46] Liu XJ, Mosier AR, Halvorson AD, Zhang FS. The impact of nitrogen placement and tillage on NO , N_2O , CH_4 and CO_2 fluxes from a clay loam soil. *Plant and Soil*, 2006, 280(1/2): 177-188
- [47] Hou AX, Tsuruta H, McCreary MA, Hosen Y. Effect of urea placement on the time-depth profiles of NO , N_2O and mineral nitrogen concentrations in an Andisol during a Chinese cabbage growing season. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, 56(6): 861-869
- [48] Jarecki MK, Parkin TB, Chan ASK, Kaspar TC, Moorman TB, Singer JW, Kerr BJ, Hatfield JL, Jones R. Cover crop effects on nitrous oxide emission from a manure-treated Mollisol. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 134(1/2): 29-35
- [49] Philippot L, Hallin S, Borjesson G, Baggs EM. Biochemical cycling in the rhizosphere having an impact on global change. *Plant and Soil*, 2009, 321(1/2): 61-81
- [50] Chen GX, Huang GH, Huang B, Yu KW, Wu J, Xu H. Nitrous oxide and methane emissions from soil-plant systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49(1): 41-45
- [51] Philippot L, Kuffner M, Cheneby D, Depret G, Laguerre G, Martin-Laurent F. Genetic structure and activity of the nitrate-reducers community in the rhizosphere of different cultivars of maize. *Plant and Soil*, 2006, 287(1/2): 177-186
- [52] Klepper LA. Nitric oxide (NO) and nitrogen dioxide (NO_2) emissions from herbicide-treated soybean plants. *Atmospheric Environment*, 1979, 13(4): 537-542
- [53] 陈冠雄, 商曙辉, 于克伟, 禹阿东, 吴杰, 王玉杰. 植物释放氧化亚氮的研究. *应用生态学报*, 1990, 1(1): 94-96
- [54] Yu KW, Chen GX. Nitrous oxide emissions from terrestrial plants: observations, mechanisms and implications // Sheldon AI, Barnhart EP. *Nitrous Oxide Emissions Research Progress*. New York, USA: Nova Science Publishers, Inc., 2009: 85-104
- [55] 李海防, 夏汉平, 熊燕梅, 张杏锋. 土壤温室气体产生与排放影响因素研究进展. *生态环境*, 2007, 16(6): 1 781-1 788
- [56] Strudley MW, Green TR, Ascough JC. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil and Tillage Research*, 2008, 99(1): 4-48
- [57] Alvarez R, Steinbach HS. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil and Tillage Research*, 2009, 104(1): 1-15
- [58] 赵其国, 黄国勤, 钱海燕. 低碳农业. *土壤*, 2011, 43(1): 1-5
- [59] Chatskikh D, Olesen JE. Soil tillage enhanced CO_2 and N_2O emissions from loamy sand soil under spring barley. *Soil and Tillage Research*, 2007, 97(1): 5-18
- [60] Ball BC, Scott A, Parker JP. Field N_2O , CO_2 and CH_4 fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. *Soil and Tillage Research*, 1999, 53(1): 29-39
- [61] Venterea RT, Burger M, Spokas KA. Nitrogen oxide and methane emissions under varying tillage and fertilizer management. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(5): 1 467-1 477

Factors Controlling N₂O and NO Emissions from Agricultural Soils and Their Influencing Mechanisms: A Review

CAI Yan-jiang^{1,2}, DING Wei-xin¹, XIANG Jian¹

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;*

2 Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment,

Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: It is of prevalent concern that agricultural soil is a significant source of atmospheric N₂O and NO. Nitrification and denitrification are the two key processes involved in N₂O and NO production. These two microbial processes and subsequent N₂O and NO emissions are strongly influenced by environment factors and management measures in the agricultural land. In this paper, a review was presented to summarize the effects of soil moisture and temperature conditions, soil texture and pH, fertilizer application and changes in tillage practice on N₂O and NO production and emission in agricultural soils.

Key words: Nitrous oxide, Nitric oxide, Freeze-thaw, Mitigation, Soil-plant system