

影响农田氧化亚氮排放过程的土壤因素*

焦 燕¹⁾ 黄 耀^{1,2)}

1) (南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

2) (中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 土壤理化特性是影响农田氧化亚氮 (N_2O) 产生和排放的重要因素。作者主要讨论了土壤微生物、土壤质地、土壤中化学物质、土壤温度和土壤 pH 值等对农田 N_2O 的影响。继续深入研究这些因素对农田 N_2O 排放的综合影响和机理以及与其排放量之间的数量关系应是未来的研究重点。为准确估计区域乃至全球范围的农田 N_2O 排放总量, 对农田 N_2O 排放模型中关键土壤参数的确定尤为重要。

关键词: 氧化亚氮; 农田; 土壤因素

1 引言

氧化亚氮 (N_2O) 是大气中的重要温室气体, 它们在大气中的浓度分别以每年 0.2%~0.3% 的速度增加, 预计到 2050 年其浓度将从目前的 $3.12 \times 10^{-4} \text{ mL L}^{-1}$ 增加到 $3.5 \times 10^{-4} \sim 4.0 \times 10^{-4} \text{ mL L}^{-1}$ [1,2]。大气中 N_2O 浓度的增加不仅加剧了全球的温室效应, 而且间接地破坏了臭氧层, 导致到达地球表面的紫外辐射增强, 使人类的生存健康受到影响。一般认为, 土壤, 特别是热带土壤和农田土壤中微生物参与下的硝化和反硝化过程所释放的 N_2O 是全球 N_2O 的主要来源, 约占生物圈释放到大气中 N_2O 总量的 70%~90% [3]。由于硝化和反硝化过程是影响 N_2O 产生的主要过程, 故影响这两个过程的因素都会影响农田 N_2O 的形成和排放。国内外已有研究表明, 影响农田 N_2O 排放的因素主要有土壤类型 (物理化学性质和微生物结构)、作物类型、农业措施 (施肥及灌溉方式) 和气候因素 (温度、降水、光照) 等。而土壤因素主要包括土壤微生物、质地、通气状况、pH 值、土壤化学物质、土壤水分含量和温度等。本文试图针对影响农田 N_2O 的土壤因素作一综述。

2 影响农田 N_2O 排放的土壤因素

2.1 土壤微生物

农田土壤 N_2O 的产生与氮素的微生物转化过程密切相关。生物硝化和反硝化过程均产生 N_2O , 硝化过程中的 N_2O 主要是由氨氧化细菌以 NO_2^- 作为电子受体将其还原产生 [4]。据研究, 在纯培养的条件下亚硝化单孢菌就可在 NH_4^+ 氧化成 NO_2^- 的过程中

2002-08-19 收到, 2003-06-09 收到再改稿

* 中国科学院“百人计划”项目资助

释放出 N_2O ^[5], 而且亚硝化螺菌、亚硝化叶菌和亚硝化球菌^[6]也可产生 N_2O 。生物反硝化过程是反硝化细菌嫌气的呼吸过程, 被认为是土壤中 N_2O 产生的主要过程。反硝化细菌广泛分布于细菌的各属之中, 且在不同土壤中呈特异性分布, 反硝化细菌的酶系统及其复杂, 这些势必导致 N_2O 排放的差异。有些细菌虽然非硝化微生物也非反硝化微生物, 但仍可参与释放 N_2O 的过程, 他们通过非呼吸的(异养)硝酸还原过程产生并释放出 N_2O , 有的还可以同时进行异养的反硝化过程^[7]。硝化、反硝化过程中相关微生物的数量及其酶活性的变化对 N_2O 排放量会产生较大影响^[8,9], 史亦等^[10]发现土壤中还原酶活性变化与土壤中反硝化强度密切相关, 并指出旱地 N_2O 产生途径可通过反硝化还原酶的活性变化加以区分。土壤生物群落的内在差异, 也将会导致 N_2O 排放不同。Holtan 等的^[11]研究还表明, 土壤反硝化微生物群落的变化同样会影响土壤 N_2O 的排放。

2.2 土壤通气状况

土壤通气状况由土壤的水分含量, 氧气在土体中的扩散难易, 以及微生物和根系对氧气的消耗程度所决定。Anderson 等^[12]利用开放式气流体系在土壤中灌注 O_2 含量不同的气体。研究表明, 土壤充氧后的 180 h 内, 灌注 O_2 含量为 100% 的土壤中 N_2O 排放量显著大于灌注 O_2 含量为 33% 和 81% 的土壤, 但超过 320 h N_2O 排放量却随 O_2 含量的降低而增加。衣纯真等^[13]发现在温度和湿度相同的条件下, 通气状况极大地影响土壤反硝化作用, 嫌气条件下反硝化作用强于好气条件。对反硝化过程而言, 其速率与 O_2 量成负相关, O_2 的存在不仅影响反硝化速率, 也影响反硝化产物的组成, O_2 浓度越低, $\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$ 比率越低; 但对于硝化过程而言, O_2 供应减少时硝化速率降低。显然, 在硝化和反硝化两个相反过程中, 适当的 O_2 浓度有利于 N_2O 的产生。当土壤处于通气和厌气区域共存或通气、厌气交替发生时, N_2O 的产生和排放量则较大。土壤通透性对 N_2O 排放的影响受多种因素相互制约, 因而比较复杂。如果土壤既有丰富的厌氧微域, 又有丰富的好氧微域, N_2O 的产生和排放往往最高^[14]。

Mosier 等^[15]报道, 由于水稻土的氧化还原交替变化 (+500~250 mV), 有两个最强烈的 N_2O 形成与排放高峰分别处于 +400 和 0 mV, 前者主要由硝化作用引起, 后者主要是反硝化作用。Kralova 等^[16]对加入 NO_3^- 的土壤悬液中反硝化作用的研究也得到类似结论。厌气、好气交替过程中氧化还原电位波动很大, 但始终高于持续厌气和低于持续好气时的电位。因此, 有报道认为, 尽管稻田间歇灌溉能显著抑制甲烷排放, 但却会促进 N_2O 的生成和排放^[17]。

2.3 土壤质地

土壤质地影响土壤的通透性和水分含量, 因而影响土壤硝化作用和反硝化作用的相对强弱及 N_2O 在土壤中的扩散速率。土壤质地还影响有机质的分解速率, 进而影响产生 N_2O 微生物的基质供应。土壤质地对旱作农田土壤 N_2O 排放通量的影响已有一些研究^[18,19], 总体而言, 重质地旱作土壤的 N_2O 排放高于轻质地土壤, 这主要是由重质地旱作土壤较强的保水能力引起的。在严格的可比较条件下研究土壤质地对农田旱作土壤 N_2O 排放通量的影响近乎等于零, 只有徐华等^[20]研究得出, 不同土壤质地的小麦和棉花田 N_2O 排放强度依次为壤土>沙土>粘土。土壤质地对水田土壤 N_2O 的影响研究较少, 李良谟和伍期途^[21]的研究结果指出, 在水稻苗期不同土壤的 N_2O 排放强度依

次为红壤型水稻土>潜育型水稻土>淹育型水稻土;徐华等^[22]发现沙质稻田土壤排放的 N_2O 显著或极显著高于壤质和粘质稻田土壤。氮肥施用后对 N_2O 排放的影响也与土壤质地有关, Mosier 等^[23] 研究发现, 在沙性土壤中少量施用氮肥不会明显增加 N_2O 排放通量, 但粘质土壤的排放量会显著增加。也有学者研究在土壤孔隙含水量 WFPS (Water-Filled Pore Space) 较高条件下, 粘土 N_2O 排放的增加是由于粘质土壤的温度系数 Q_{10} 比沙质土壤大, 促进了反硝化作用^[24]。

2.4 土壤化学物质

(1) 土壤氮素。硝酸盐和铵的浓度在许多估算 N_2O 排放通量的模型中被作为关键参数。 NH_4^+ 的氧化往往比由矿化作用产生 NH_4^+ 的速率快得多, 如果此时 O_2 的供应受到限制, NO_3^- 不能被彻底氧化成 NO_3^- , 就会导致 N_2O 生成量的增加。此外, Mulvancy 等^[25] 报道, 氨态氮肥通过影响土壤水溶性有机碳的含量和 pH 值, 促进反硝化作用, 增强 N_2O 排放。 NO_3^- 不但促进反硝化速率, 而且抑制或延迟 N_2O 还原为 N_2 , 因此土壤 N_2O 排放一般都随 NO_3^- 浓度的增加而增加。Lemke 等^[26] 研究两个不同地点的农田 N_2O 季节性分布规律表明, N_2O 排放时间变异性的 65% 可由土壤 NO_3^- -N 含量决定。Stevens 等^[27] 研究农田土壤 N_2O 排放时发现增加 NO_3^- 含量对反硝化速率影响较小, 但能显著增加 N_2O 的排放; 在低 pH 值下 NO_3^- 含量对 N_2O 的影响程度增强, 因此合理的处理 NO_3^- 含量和 pH 值间的相互作用可减少 N_2O 排放。李亚星^[28] 的田间试验结果也表明, 土壤各层 NO_3^- -N 含量的变化对反硝化作用无明显影响, 可见, 土壤中 NO_3^- 并不主要是通过促进反硝化速率来影响 N_2O 排放。

(2) 土壤碳素。绝大多数微生物从有机碳中获得能量和基质, 因此有机碳对土壤微生物过程的类型和强度有重大影响, 这些过程也包括 N_2O 的形成和还原。有机碳为土壤呼吸作用提供基质, 而呼吸作用可能导致氧气供应的限制和 CO_2 浓度的增加。土壤中的有机碳有利于 N_2O 的形成, 其含量与 N_2O 生成量呈正相关^[29]。Speir 等^[30] 以 ^{15}N 标记 NO_3^- 和 NH_4^+ 的研究表明, 有机碳加入土壤后 N_2O 生成量增加的最可能原因是提高了反硝化速率。也有研究表明, 易降解的有机碳可促进反硝化作用彻底进行, 从而降低 $\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$ 比率。同时一些研究者还发现, 有机碳作为电子供体影响反硝化作用和 N_2O 的生成, 但这种影响并不是直接的^[31], 有机碳的变化与其他影响 N_2O 生成的因子有关^[32]。有机质活性程度是 N_2O 形成的限制因子, 施用绿肥与施用无机肥相比, 可导致更多的 N_2O 产生。大部分微生物从有机质中获取能量与物质, 这些物质主要影响土壤微生物过程的类型与强度, 包括导致形成和减少 N_2O 。有机物料的 C/N 比也影响硝化作用和 $\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$ 的比率。Baggs 等^[33] 研究农田土壤在施入作物残渣后对 N_2O 排放的影响时发现, C/N 低的作物残渣会增加 N_2O 排放。土壤微生物活动适宜的 C/N 比为 (25~30):1, 如果 C/N 大于 (25~30):1, 有机质分解慢, 微生物活性弱, N_2O 排放受到抑制。另外, 有报道认为作物秸秆腐解能产生化感物质, 可明显抑制土壤 N_2O 的释放^[34]。

(3) 土壤其他化学物质。Clemens 等^[35] 统计分析发现盐土中 N_2O 的排放与土壤参数 NO_3^- 和 NH_4^+ 以及无机碳和有机碳含量不相关。也有报道称盐土中的反硝化主要产生 N_2O , 因为这种土壤含有少量可以将 N_2O 还原为 N_2 的细菌^[36]。Inubushi 等^[37] 模拟农田条件, 将盐加入到土壤溶液中。实验证明, 土壤中盐含量高能抑制硝化过程, 含

量低对硝化过程影响不明显;但不同的盐含量对 N_2O 排放没有显著的影响。因此土壤中盐基离子含量对 N_2O 排放的影响,有待进一步研究。黄正等^[38]在实验室研究了3种重金属离子 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 对人工湿地反硝化作用的影响,检测其 N_2O 的产生,发现 N_2O 的产生均显著降低。土壤中的一些重金属离子与其中的有机、无机组分发生吸附、络合、沉淀作用,形成碳酸盐、磷酸盐、铁锰氧化结合态和有机质硫化物结合态等有效地影响了土壤中微生物的代谢活性, N_2O 是硝化细菌和反硝化细菌等微生物代谢作用的结果,因此这些金属离子也影响土壤 N_2O 的排放。在石灰性土壤上加酸和施用磷肥,或在酸性土壤中施用碳酸钙,有利于硝化细菌的活动,能增加好气条件下 N_2O 的逸出量。

2.5 土壤 pH 值

土壤 pH 值可通过影响反硝化和硝化微生物的活性及相应的氮素转化过程而影响 N_2O 的释放。一般认为,反硝化作用最适宜的 pH 值在 7.0~8.0 之间,而硝化过程的自养硝化菌的最适 pH 值也在 7.0~8.0 之间。但异氧微生物则可在较大 pH 值范围内活动。Daum 和 Schenk^[39]监测到当土壤 pH 值为中性时 N_2 是反硝化的主要产物,当 pH 值降低时有利于 N_2O 的释放。因此 N_2O 常表现为酸性土壤中反硝化的主要产物, $\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$ 比例随 pH 值下降而上升。Stevens 等^[27]研究发现,降低 pH 值对反硝化速率影响较小,但能显著增加 N_2O 的排放;而对于硝化作用来说, pH 值在 3.4~8.6 数值范围内 N_2O 排放与土壤的 pH 值呈正相关^[40]。

Bremner 和 Blackmer^[41]对3种植玉米和大豆的美国艾奥瓦土壤的 N_2O 排放进行了研究,结果表明 pH 值为 7.8 的土壤排放的 N_2O 比 pH 值为 6.6 和 5.4 的土壤高 3 倍。在另一研究中,他们在 pH 值为 8.1~8.2 和 6.2~6.8 的土壤中分别加入 NH_4^+ 后好气培养,发现前者的 N_2O 排放比后者高 6~8 倍^[42]。与这些结果不同的是,Weier 和 Gilliam^[43]在施用石灰使土壤 pH 值从 4.2~5.0 上升到 6.6~7.6 时, N_2O 排放量急剧下降。

当温度、水分含量等其他条件不同时, pH 值对 N_2O 排放量的影响也不一样。Goodroad 和 Keeney^[44]的实验室研究发现,加入 NH_4^+ 的土壤在 30℃ 和 30% 水分含量的条件下培养, pH 值为 5.1 和 6.7 时的 N_2O 排放量比 pH 为 4.7 时分别高 3 倍和 4 倍;但在 10~20℃ 下,水分含量为 10%~20% 时, pH 值的影响不明显。因此水作农田土壤和旱作农田土壤的 pH 值对 N_2O 排放影响可能有不同规律,这方面的研究报道还很少。

2.6 土壤水分

土壤水分可通过不同的途径影响 N_2O 的形成和排放。土壤中水分的分布影响溶质的迁移,从而影响 NH_4^+ 和 NO_3^- 浓度的分布及其对微生物的有效性。一般而言,水分增加导致通气性变差,促进反硝化过程,减弱硝化过程。故当土壤水分含量既能促进硝化也能促进反硝化作用时,会导致大量的 N_2O 生成与排放。研究表明,最大 N_2O 排放一般发生在土壤湿度为 90%~100% 田间持水量或 77%~86% WFPS 之间^[45]。封克等^[46]的研究也表明,在土壤含水量为 WFPS 的 45%~75% 时,硝化和反硝化共同作用产生较多的 N_2O 。在这个范围内硝化细菌和反硝化细菌都可能成为 N_2O 的主要缔造者。一般农业土壤的水分含量多在田间持水量以下,众多研究者都发现 N_2O 排放量与

土壤水分含量成正相关^[45,47]。不同水分含量下硝化和反硝化哪种过程对 N_2O 的生成起主导作用尚存争议。土壤处于饱和含水量以下时, 由硝化作用产生的 N_2O 占总产生量的 61%~98%, 此时, N_2O 的排放量随土壤水分的增加而增加, 硝化作用是 N_2O 的最基本来源。而在饱和含水量以上, 反硝化作用是 N_2O 产生的主要来源, 但随着土壤水分含量的增加, 土壤中的氧气供给越来越少, 反硝化产物中 N_2 的比例逐渐增加, N_2O 的排放逐渐减弱, 因此高水分含量条件下, N_2O 的产生并不与土壤含水量成正比^[48]。对于水田土壤来说, 水稻土 N_2O 的排放主要集中在水分变化剧烈的干湿交替阶段, 其来源有待确定, 但这一阶段极大的促进了 N_2O 排放^[46,49,50]。郑循华等^[61]对稻麦轮作系统 N_2O 的研究发现, N_2O 的产生和排放有一最佳湿度条件, 当土壤湿度为田间持水量的 97%~100% 或 84%~86% WFPS 时, N_2O 排放最强; 低于此湿度范围时, N_2O 排放通量与土壤湿度呈正相关; 高于此湿度范围时则呈负相关。过饱和的土壤溶液由于其对气体扩散的抑制也会引起 N_2O 在土壤溶液中累积; 此外 N_2O 过饱和溶于土壤溶液中导致 N_2O 在土壤溶液中暂时被储存, 最终造成排放量的减少^[52]。另外, 土壤含水量还通过对硝化、反硝化细菌酶的活性影响而对 N_2O 的生成量产生影响。据侯爱新等^[53]对水稻田水分含量变化的研究表明, 土壤含水量较高的淹水期, 由于淹水造成的厌氧环境可以抑制硝化细菌 NH_4^+ 单氧化酶的活性, 同时, 反硝化作用则由于氧化还原电位降至 0 mV 以下, 代谢产物主要以 N_2 为主, 所以几乎没有 N_2O 的净排放。而落干期, 由于可得性氧气增多, 硝化细菌酶活性抑制被解除, 反硝化作用中 N_2O 还原酶活性开始受到抑制, 代谢产物中, $\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$ 的比例增大。另一方面, 土壤含水量还将对 N_2O 的排放过程产生影响。研究表明, N_2O 气体在水分不饱和土壤中主要通过孔隙内的气体介质扩散传输, 其扩散系数比在水分饱和土壤中大 2~4 个数量级, 从而使得水分不饱和土壤的 N_2O 排放日变化主要取决于土壤中 N_2O 的产生过程, 而水分过饱和土壤则主要取决于 N_2O 的扩散传输过程^[53,54]。

农田土壤表层的水层深度也影响 N_2O 排放。Jacinthe 等^[55]通过土柱试验研究水层深度对 N_2O 的影响, 试验证明 10 cm 水层的 N_2O 排放显著大于 50 cm 水层的 N_2O 排放量。

2.7 土壤温度

土壤温度影响微生物的代谢活动及硝化和反硝化速率, 土壤微生物的活性、反硝化及硝化速率都随土温升高而增加。反硝化作用产物比 $\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$ 随土温升高而降低, 硝化作用产物比 $\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$ 则相反。据研究, 15~35 °C 是硝化作用微生物活动的适宜温度范围, 其中最适范围为 25~35 °C, <5 °C 或 >40 °C 都抑制硝化作用发生; 反硝化微生物所要求的适宜温度为 5~75 °C^[56], 最适宜范围为 30~67 °C。另外, 刘晔等^[57]对北京森林生态系统的研究表明, 当温度较低时, 在一定的温度段 (15~7 °C), N_2O 还可能会出现负排放。总的来说, 土壤 N_2O 的排放速率是随土壤温度升高而增加的。温度对土壤 N_2O 排放影响的研究大多是在实验室进行, 在 20~40 °C 之间 N_2O 产生量随温度上升迅速增加^[44]。对于农田土壤来说, 温度的影响可部分地解释 N_2O 排放的日变化和季节变化。由于 N_2O 产生与扩散传输过程的综合作用, N_2O 排放速率的变化几乎与表层土壤温度同步, 温度的变化使得 N_2O 的排放具有较为明显的日变化与季节变化^[58]。郑循华等^[56]发现当土壤湿度比较适宜时, N_2O 排放通量对温度的依赖性可用指

数函数 $F=Ae^{at}$ 来描述, 式中 F 为 N_2O 日平均排放通量, t 为 5 cm 土层深度的日平均温度, A 和 a 为常数。

温度对 N_2O 形成量的影响与土壤含水量有关, 当土壤含水量为田间持水量的 65% 时, 28 °C 和 38 °C 下形成的 N_2O 量相近, 但当含水量为田间持水量的 32% 时, 38 °C 下的形成量大于 28 °C^[59]。

3 农田生态系统 N_2O 排放模型涉及的土壤因素

农田土壤 N_2O 排放是温度、 O_2 和反应底物浓度以及传输过程相互作用的结果^[56]。而估算 N_2O 排放量的模型正是基于土壤、气候以及农业管理措施等各因素之间的相互作用对 N_2O 排放影响的机理建立的。土壤特性、作物生长及氮素利用^[60]等是 CENTURY 模型、DNDC、ExpertN、NASA-Ames version of the CASA 等预测微量气体排放量模型考虑的基本参数, 但许多估算模型在土壤参数方面还有很大的不确定性。Mahmood 等^[61]研究发现, 玉米田的 N_2O 排放与反硝化速率和土壤 $NO_3^- - N$ 含量有显著相关性, 但与土壤温度和土壤 $NH_4^+ - N$ 含量无关; 然而, 麦田 N_2O 排放与土壤 $NO_3^- - N$ 、 $NH_4^+ - N$ 含量以及土壤温度有很强的相关关系, 与反硝化速率无明显相关性。这两种农田的 N_2O 排放与土壤孔隙含水量、土壤呼吸都未表现出明显相关关系。Conen 等^[62]在荷兰预测农田 N_2O 排放的经验性模型涉及 3 个土壤参数, 包括表层土壤矿化氮含量, 土壤孔隙含水量, 土壤温度。英国学者 Skiba 等^[63]研究了 22 个不同地点的农业和半农业土壤的 N_2O 排放发现, 尽管 22 个地点的土壤物理化学特性有很大差异, 但每个地点的 N_2O 平均排放通量都可用一个包括土壤温度、年平均氮施入量及土壤含水量的多元回归方程表示。Kaiser 等^[64]研究发现土壤 N_2O 排放与土壤粘粒含量, 有机碳和矿化氮含量, 以及施用的矿质氮含量有关, N_2O 排放率的 73.4% 可由土壤粘粒含量和矿化氮确定的回归方程决定。

4 研究展望

由于 N_2O 排放源广泛, 并且目前对 N_2O 诸排放源以及排放机理的研究较其他温室气体更为薄弱, 因此应加强对反硝化和硝化过程发生机理及微生物学机制方面的研究。尽管国内外学者对影响农田 N_2O 排放的土壤因素做了大量研究, 但大都是单因素研究, 而且由于农业管理措施及气候条件等影响, 使得不同研究者的研究结果不尽相同。特别是土壤作为一个不均匀的物体, 不但有机物质而且土壤生物在土壤中的分布均有较大的空间变异性, 而且由此产生了硝化与反硝化强度的变异性^[65], 时间上的变异状况更为突出^[66]。所有这些均给测定的准确性带来很大困难。政府间气候变化协调委员会 (IPCC) 在其 2000 年出版的国家温室气体排放清单编制指南中指出, 为了提高编制农田温室气体排放清单的准确性, 需要考虑有关的土壤特性^[67]。因此, 深入研究多个土壤参数对农田 N_2O 排放的综合影响和其影响机理, 以及它们之间的数量关系乃是未来的研究主题之一, 围绕这个主题, 亟需在如下几个方面开展深入研究:

(1) 土壤参数对农田 N_2O 排放的综合影响研究。需进一步证实不同土壤质地及土

壤含水量、pH 值等土壤理化性质对农田 N_2O 排放规律的影响; 加强土壤中化学物质对 N_2O 产生和排放影响的研究; 着重探讨土壤质地、碳氮元素和 pH 值等对 N_2O 排放的综合影响及影响机理; 给出在类似的气候条件和栽培管理下影响农田 N_2O 排放的关键土壤参数, 确定农田 N_2O 产生与排放强度以及它们之间的数量关系; 阐明不同农田土壤施用化肥对 N_2O 排放的影响规律及其与土壤参数间的数量关系等。

(2) 农田生态系统 N_2O 排放模型研究中关键土壤参数的确定。由于区域间气候和土壤差异显著, 且栽培管理方式亦不尽相同, 人们不可能对各种条件组合下的农田生态系统均设点观测以取得农田 N_2O 的排放通量, 因而准确估计现行耕作制度和农业技术措施下农田 N_2O 的排放量乃是制定减排目标和确定减排措施的基础。因此, 建立一个受气候、土壤及农业管理措施综合影响的农田 N_2O 排放模型尤为重要, 这是准确估计区域范围乃至全球范围农田 N_2O 排放总量的一条有效途径。

(3) 不同农田土壤 N_2O 排放的综合增温潜势研究。着重研究不同农田土壤在水-旱轮作和旱-旱轮作制度下 N_2O 排放的季节性变化特征、年排放总量及全球综合增温潜势 (GWP, Global Warming Potential)。

(4) IPCC1996 指南中提供的施用氮肥直接释放 N_2O 的排放因子并没有考虑不同农业土壤类型和农作物类型的差别。IPCC 推荐的方法和排放因子是在以旱地为主的西方国家田间实验研究基础上确定的, 可能并不适合于中国水稻田面积较大的具体情况。中国 N_2O 排放的土壤源可粗略地划分为水稻田和旱地两大类型, 根据气候区 (诸如湿润区、干旱区、半干旱区等) 又可将它们划分为若干亚类。对于不同类型的农田, 施用氮肥直接释放 N_2O 的排放因子可能有很大差别。氮肥施用是农田排放 N_2O 的主要排放来源, 因此, 应当准确定量总氮肥消耗量在水稻田的分配比例。为了估算中国施肥土壤的 N_2O 排放, 无论采用任何方法都应能够区分各种主要类型农田的 N_2O 排放差别, 然而, IPCC1996 提供的方法和缺省值却无法区分。因此, 在应用有效模式来计算各主要源的 N_2O 排放因子时, 计算排放因子的模式应当能够综合诸如氮肥类型和用量、降水或灌水、温度、土壤性质、有机肥、土壤有机碳含量等各种关键调节因素的影响。

参 考 文 献

- 1 Rodhe, H. A., Comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect, *Science*, 1990, **248**, 1217~1219.
- 2 王明星、张仁健、郑循华, 温室气体的源与汇, 气候与环境研究, 2000, **5** (1), 75~79.
- 3 Bouwman, A. F., Exchange of greenhouse gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere, *Soils and the Greenhouse Effect*, Bouwman, A. F., Ed, Chichester: John Wiley & Sons, 1990, 61~127.
- 4 Poth, M., Dinitrogen production from nitrite by a *Nitrosomonas* isolate, *Applied and Environmental Microbiology*, 1986, **52** (40), 957~959.
- 5 Anderson, I. C., and J. S. Levine, Relative rates of nitric oxide and nitrous oxide production by nitrifiers, denitrifiers, and nitrate respirers, *Applied and Environmental Microbiology*, 1986, **51** (5), 938~945.
- 6 Blackmer, A. M., J. M. Bremner, and E. L. Schmidt, Production of nitrous oxide by ammonia-oxidizing chemoautotrophic microorganisms in soil, *Applied and Environmental Microbiology*, 1980, **40** (6), 1060~1066.
- 7 Conrad, R., *Denitrification in Soil and Sediment*, New York: Plenum Press, 1990, 105~128.
- 8 85-913-04-05 攻关课题组, 我国农用氮肥氧化亚氮排放量变化趋势预测 (1990~2020), 农业环境保护, 1994,

- 13 (6), 259~261.
- 9 Bouwman, A. F., I. Fung, and E. Matthews et al., Global analysis of the potential for N_2O production in natural soils, *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, **7** (3), 557~597.
- 10 史亦、黄国宏, 土壤中反硝化酶活性的变化与 N_2O 排放的关系, 应用生态学报, 1999, **10** (3), 329~331.
- 11 Holtan, H. L., P. Dorsch, and L. R. Bakken, Comparison of denitrifying communities in organic soils; kinetics of NO_3^{4-} and N_2O reduction, *Soil Biol. Biochem.*, 2000, **32** (6), 833~843.
- 12 Anderson, L., and R. Parsons, An open gas-flow system for investigating the response of nitrous oxide fluxes from soil cores to different oxygen concentrations, Progress in nitrogen cycling studies; Proceedings of the 8th Nitrogen Workshop held at the University of Ghent, USA, 1996, 5~8 September, 507~511.
- 13 衣纯真、梁洪波、张建华等, 温度、湿度及通气状况对土壤中 N_2O 释放量影响的研究, 土壤水和养分的有效利用, 李鹤珠、陆锦文、罗远培主编, 北京: 北京农业出版社, 1994, 120~125.
- 14 Granli, T., and O. C. Bockman, Nitrous oxide from agriculture, *Norwegian Journal of Agriculture Science*, 1994, **12**, 7~128.
- 15 Mosier, A. R., W. D. Guenzi, and Schweizer, Soil Losses of methane from submerged paddy soils, *Plant and Soil*, 1986, **92**, 223~233.
- 16 Kralova, M., P. H. Masscheleyn, and C. W. Lindau et al., Production of dinitrogen and nitrous oxide in soil suspensions as affected by redox potential, *Water, Air, Soil Pollute*, 1992, **61**, 31~45.
- 17 徐华、邢光熹、蔡祖聪, 太湖地区水田土壤 N_2O 排放通量及其影响因素, 土壤学报, 1995, **32** (2), 144~150.
- 18 Duxbury, J. M., D. R. Bouldin, and R. L. Tate, Emission of nitrous oxide from soils, *Nature*, 1982, **298**, 462~464.
- 19 王少彬、宋文质、苏维瀚等, 冬小麦田氧化亚氮的排放, 农业环境保护, 1994, **13** (5), 210~212.
- 20 徐华、邢光熹、蔡祖聪等, 土壤质地对小麦和棉花田 N_2O 排放的影响, 农业环境保护, 2000, **19** (1), 1~3.
- 21 李良漠、伍期途, 原位条件下不同土壤中 N_2O 的通量, 土壤, 1991, **23** (1), 24~27.
- 22 徐华、邢光熹、蔡祖聪, 土壤水分状况和质地对稻田 N_2O 排放的影响, 土壤学报, 2000, **37** (3), 499~505.
- 23 Mosier, A. R., W. J. Parton, and S. Phongpan, Long-term large N and immediate small N addition effects on trace gas fluxes in the Colorado shortgrass steppe, Proceedings of the 9th Nitrogen Workshop, Braunschweig, Germany, *Biology and Fertility of Soils*, 1999, **28** (1), 44~50.
- 24 Smith, K. A., P. E. Thomson, and H. Clayton et al., Effects of temperature, water content and nitrogen fertilisation on emissions of nitrous oxide by soils. Terrestrial initiative in global environmental research-the TIGER trace gas program, *Atmospheric Environment*, 1998, **32** (19), 3301~3309.
- 25 Mulvaney, R. L., S. A. Khan, and C. S. Mulvaney, Nitrogen fertilizers promote denitrification, *Biology and Fertility of Soils*, 1997, **24**, 211~220.
- 26 Lemke, R. L., R. C. Izaurralde, and M. Nyborg, Seasonal distribution of nitrous oxide emissions from soils in the Parkland region, *Soil Science Society of America Journal*, 1998, **62** (5), 1320~1326.
- 27 Stevens, R. J., R. J. Laughlin, and A. Mosier et al., Eds., Measurement of nitrous oxide and di-nitrogen emissions from agricultural soils, International workshop on dissipation of N from the human N-cycle, and its role in present and future N_2O emissions to the atmosphere, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, **52** (3), 131~139.
- 28 李亚星, 麦田土壤反硝化量与土壤含水量、温度、 NO_3^- -N 含量的关系, 土壤水中养分的利用, 北京: 农业出版社, 1993, 133~138.
- 29 Iqbal, M., Potential rates of denitrification in 2 field soils in southern England, *Agric. Sci.*, 1992, **118**, 223~227.
- 30 Speir, T. W., H. A. Kettles, and R. D. More, Aerobic emissions of N_2O and N_2 from soil cores: factors influencing production from ^{15}N -labeled NO_3^- and NH_4^+ , *Soil Biol. Biochem.*, 1995, **27**, 1299~1306.
- 31 Sahrawat, K. L., D. R. Keeney, and S. S. Admas, Nitrous oxide emission from soils, *Adv. Soil Sci.*, 1986, **4**, 103~148.

- 32 Firestone, M. , Biological denitrification, *Nitrogen in Agriculture Soil*, Stevenson, F. J. et al. , Eds, Soil Science Society of America, WI, USA, 1982, 289~326.
- 33 Baggs, E. M. , R. M. Rees, and C. A. Watson, Nitrous oxide emission from soils after incorporating crop residues, *Soil Use and Management*, 2000, **16** (2), 82~87.
- 34 黄益宗、张福珠、刘淑琴等, 化感物质对土壤 N_2O 释放影响的研究, *环境科学学报*, 1999, **19** (5), 478~482.
- 35 Clemens, J. , M. P. Schillinger, H. Goldbach et al. , Spatial variability of N_2O emission and soil parameters of an arable silt loam: A field study, *Biology and Fertility of Soils*, 1999, **28** (4), 403~406.
- 36 Strpanov, A. , Abstracts, 2nd session, 11th International symposium on Environmental Biogeochemistry, Salamanca, 1993.
- 37 Inubushi, K. , M. A. Parahona, and K. Yamakawa, Effects of salts and moisture content on N_2O emission and nitrogen dynamics in yellow soil and Andosol in model experiments, *Biology and Fertility of Soils*, 1999, **29** (4), 401~407.
- 38 黄正、K. Sakadevan, J. Bavor et al. , Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 对人工湿地反硝化作用的影响, *环境科学*, 2000, **21** (7), 110~112.
- 39 Daum, D. , and M. K. Schenk, Influence of nutrient solution pH on N_2O and N_2 emissions from a soilless culture system, *Plant and Soil*, 1998, **203**, 279~287.
- 40 陈文新, 土壤环境微生物学, 北京: 北京出版社, 1989, 133~151.
- 41 Bremner, J. M. , and A. M. Blackmer, Nitrous oxide: Emission from soils during nitrification of fertilizer nitrogen, *Science*, 1978, **199**, 295~296.
- 42 Bremner, J. M. , and A. M. Blackmer, Mechanism of nitrous oxide production in soil, *Biochemistry of Ancient and Modern Environments*, Trudinger, P. A. , M. R. Walter, and R. J. Ralph, Eds. , Australian Academy of Science, Canberra, 1980, 279~291.
- 43 Weire, K. L. , and J. W. Gilliam, Effect of acidity on denitrification and nitrous oxide evolution from Atlantic coastal-plain soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.* , 1986, **50**, 1020~1025.
- 44 Goodroad, L. L. , and D. R. Keeney, Nitrous oxide production in aerobic soils under varying pH, temperature and water content, *Soil Biol. Biochem.* , 1984, **16**, 39~43.
- 45 郑循华、王明星、王跃思, 华东稻麦轮作生态系统的 N_2O 排放研究, *应用生态学报*, 1997, **8** (5), 495~496.
- 46 封克、殷士学, 影响氧化亚氮形成与排放的土壤因素, *土壤学进展*, 1995, **23** (6), 35~40.
- 47 Mosier, A. R. , W. D. Guenzi, and E. E. Schweizer, Soil losses of dinitrogen and nitrous oxide from irrigated crops in northeastern Colorado, *Soil Science Society of America Journal*, 1986, **50**, 344~348.
- 48 Mummey, D. L. , J. L. Smith, and J. R. H. Bolton, Nitrous oxide flux from a Shrub-steppee ecosystem: source and regulation, *Soil Biol. Biochem.* , 1994, **26** (2), 279~286.
- 49 Cai Zucong and Xing G, Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management, *Plant and Soil*, 1997, **196**, 7~14.
- 50 王智平、曾江海、张玉铭, 农田土壤 N_2O 排放的影响因素, *农业环境保护*, 1994, **13** (1), 40~42.
- 51 郑循华、王明星、王跃思等, 稻麦轮作生态系统中土壤湿度对 N_2O 产生与排放的影响, *应用生态学报*, 1996, **7** (3), 273~279.
- 52 Heincke, M. , and M. Kaupenjohann, Effects of soil solution on the dynamics of N_2O emissions: a review, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, **55** (2), 133~157.
- 53 侯爱新、陈冠雄、吴杰等, 稻田 CH_4 和 N_2O 排放关系及其生物学机理和一些影响因子, *应用生态学报*, 1997, **8** (3), 270~274.
- 54 郑循华、王明星、王跃思等, 华东稻田 CH_4 和 N_2O 排放, *大气科学*, 1997, **21** (2), 231~237.
- 55 Jacinth, P. A. , W. A. Dick, and L. C. Brown, Bioremediation of nitrate-contaminated shallow soils and waters via water table management techniques: evolution and release of nitrous oxide, *Soil Biol. Biochem.* , 2000, **32** (3), 371~382.
- 56 郑循华、王明星、王跃思等, 温度对农田 N_2O 产生与排放的影响, *环境科学*, 1997, **18** (5), 1~5.

- 57 刘晔、牟玉静、钟晋贤等, 氧化亚氮在森林和草原中的地-气交换, 环境科学, 1997, **18** (5), 15~18.
- 58 Bremner, J. M., S. G. Robbins, and A. M. Blackmer, Seasonal variability in emission of nitrous oxide from soil, *Geophysical Research Letters*, 1980, **7** (9), 641~644.
- 59 朱兆良、文启孝, 中国土壤氮素, 南京: 江苏科学技术出版社, 1992.
- 60 Frolking, S. E., A. R. Mosier, and D. S. Ojima et al., Comparison of N_2O emissions from soils at three temperate agricultural sites: simulations of year-round measurements by four models, International workshop on dissipation of N from the human N-cycle, and its role in present and future N_2O emissions to the atmosphere, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, **52** (3) 77~105.
- 61 Mahmood, T., R. Ali, K. A. Malik et al., Nitrous oxide emissions from an irrigated sandy-clay loam cropped to maize and wheat, *Biology and Fertility of Soils*, 1998, **27** (2), 189~196.
- 62 Conen, F., K. E. Dobbie, and K. A. Smith., Predicting N_2O emissions from agricultural land through related soil parameters, *Global Change Biology*, 2000, **6** (4), 417~426.
- 63 Skiba, U. M., L. J. Sheppard, J. MacDonald et al., Some key environmental variables controlling nitrous oxide emissions from agricultural and semi-natural soils in Scotland, Terrestrial initiative in global environmental research-the TIGE trace gas programme, *Atmospheric Environment*, 1998, **32** (19), 3311~3320.
- 64 Kaiser, E. A., and F. Eiland, What predicts nitrous oxide emissions and denitrification N-loss from European soils, *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 1996, **159** (6), 541~547.
- 65 王敬国, 土壤氮素的转化过程中温室效应气体的释放和吸收, 环境科学研究, 1993, **6** (5), 47~51.
- 66 Post, W. M., and L. K. Mann, *Soils and Greenhouse Effect*, Chichester: John Wiley & Sons, 1990, 402~406.
- 67 IPCC, Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, Tokyo: IGES, 2000, 4.5.3~4.8.

Influence of Soil Properties on N_2O Emissions from Farmland

Jiao Yan¹⁾, and Huang Yao^{1,2)}

1) (College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 2100952)

2) (Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract A brief account on influence of soil properties on N_2O emissions from farmland was given. Key soil factors influencing the production and emission of N_2O are soil texture, soil trace elements, soil temperature and so on. To accurately estimate N_2O emissions from farmland and hence to reduce the emissions, further study should focus on the quantitative description of N_2O emissions associated with these key factors.

Key words: nitrous oxide; farmlands; impact factor