

农业土壤 NO 排放研究进展^①

曹彦圣^{1,2}, 田玉华¹, 尹 斌^{1*}, 朱兆良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 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:本文综述了近年来有关农业土壤 NO 排放研究的进展, 包括 NO 的形成机制、采集与测定方法、排放量、影响 NO 排放的主要因素以及减少 NO 排放的有关措施等; 在此基础上, 提出了今后一段时期, 我国农业土壤 NO 排放研究的重点仍然要更深入探讨农业土壤 NO 的产生和排放机制、主要影响因素与 NO 排放的定量关系、通过模型的建立估算不同区域农业土壤 NO 的排放量以及提出合理的减排措施。

关键词: NO; 产生机制; 测定方法; 排放量; 影响因素; 减排措施

中图分类号: S19

作为大气中一种非常活跃的痕量气体, NO 显著影响大气环境质量和地球生态环境。在对流层中, NO 易于被氧化为亚稳态的 NO₂^[1], 并可以进一步转化为亚硝酸和硝酸^[2]。含有这两种无机酸的干湿沉降促进了生态系统的酸化和富营养化^[3], 导致生态系统中生物多样性的减少。对流层中的挥发性烷烃与 NO 间的反应, 起着控制对流层臭氧浓度的作用^[1], 对流层臭氧可以引起一系列氧化反应^[4]。从对流层扩散到平流层的 NO 消耗平流层的臭氧^[5], 从而引起大气臭氧空洞。土壤是大气 NO 的主要排放源之一, 土壤 NO 排放量约占全球 NO 排放总量的 20%^[6]。而农业土壤则是最重要的土壤 NO 排放源。据估计^[7], 农业土壤 NO 排放量约占全球土壤排放总量的 41%。因此, 研究减少农业土壤 NO 排放的措施极为重要。而为了开发减排措施, 必须系统理解土壤中 NO 的产生过程和影响土壤 NO 排放的因素等。本文在国内外大量文献的基础上, 系统阐述了近年来农业土壤 NO 排放的研究进展, 旨在为深入研究我国农业土壤 NO 排放、开发减少 NO 排放的措施提供参考。

1 土壤 NO 的形成机制

在土壤中, NO 主要来源于自养和异养硝化细菌的硝化作用, 硝化细菌和反硝化细菌的反硝化作用, 酵母的硝酸盐呼吸作用及化学反硝化作用(一种在完全好氧条件下的非酶促反应)^[2,8]。在硝化过程中, 硝

化细菌可以把羟胺(NH₂OH)氧化为 NO^[9]。在生物反硝化过程中, 硝态氮或亚硝态氮被还原为氮素的氧化物(NO 和 N₂O)^[10]。但是, 由硝化作用和反硝化作用所产生的 NO 的相对量存在较大的时空变异性。一般认为, 土壤 NO 排放主要来源于硝化作用^[11-12]。Anderson 和 Levine^[2]研究了氧气分压对 NO 及 N₂O 排放的影响, 结果发现, 好氧土壤可能是 NO 的主要来源。Hutchinson 等^[13]甚至发现, 即使在含水量最大的土壤中, 硝化作用也是 NO 的主要排放源。NO 排放随化能自养菌对铵态氮的氧化而变化, 而且当加入硝化抑制剂时 NO 排放受到抑制^[13]。Stohl 等^[14]的研究结果则表明, 由于硝化作用的原因, 有 1%~4% 的施入土壤中的铵态氮被转化为 NO。Russow 等^[15]也发现, 铵态氮的硝化作用是土壤 NO 排放的主要来源, 反硝化作用产生的 NO 仅占土壤 NO 排放量的 12%~17%。但是, Remde 和 Conrad^[16]却发现, 反硝化作用也可能是 NO 的主要来源。因为反硝化作用 NO 的排放量约为硝化作用排放量的 2 倍。而且, Gödde 和 Conrad^[17]甚至发现, 在所研究的一部分土壤中, 反硝化反应是 NO 唯一的来源。区别 NO 主要排放源的基本原则在于: 如果 NO 排放量与铵态氮的含量及增强的通风相关, 就可以确定硝化作用是 NO 的主要来源; 另一方面, 如果 NO 排放量与硝态氮的消耗及厌氧条件相关, 则可以认为反硝化作用是 NO 的主要来源^[18]。另一个 NO 源可能是化学反硝化作用^[19],

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071197, 31000940)资助。

* 通讯作者(byin@issas.ac.cn)

作者简介: 曹彦圣(1981—), 男, 山西朔州人, 博士研究生, 主要从事农田氮循环研究。E-mail: huda_128@163.com

这是一种在完全好氧条件下的非酶促亚硝酸盐分解反应^[2, 20], NO 来源于亚硝酸盐与有机物的反应或者自身的分解^[21]。Davidson^[22]发现,在土壤为酸性,亚硝酸盐充足的条件下,土壤微域内 NO 的产生可能很显著。Chalk 和 Smith^[23]指出,在 pH < 5 的土壤中或者在有利于亚硝酸盐累积的条件下,化学反硝化作用是一个重要的 NO 排放源。此外,关于 NO 产生/消耗的生物过程,除了硝化作用和反硝化作用之外,人们现在已经了解到许多有不同代谢途径的微生物可能也参与 NO 的新陈代谢^[18]。尽管如此,已有的大量研究表明,人们对 NO 的产生机制仍然处于较肤浅的阶段,还需要进行更多的更加深入和完整的研究。

2 土壤 NO 排放的采集与测定方法

土壤 NO 排放的采集方法一般有两类:气室法^[24]和微气象学法^[25]。气室法又包括静态室法^[26](static chamber method)和动态室法^[27](dynamic chamber method)。由于微气象学法对待测土壤及其周边环境几乎没有扰动,因此,被作为基准测定方法,用作区域基准通量的测定。不过采用微气象学法进行测定需要较大面积的地块,使得试验成本很高,所以,该方法不适用于需要进行多种条件与处理同时进行比较的试验。相比之下,气室法需要的地块很小,大大降低了试验成本,特别适用于在小区试验中需要同时进行多种条件比较的试验。此外,已有研究证明^[24],气室法只要条件控制与操作得当,其测定的通量结果与微气象学法所得结果并没有显著差异。因此,气室法现广泛应用于室内或田间的多处理试验中。

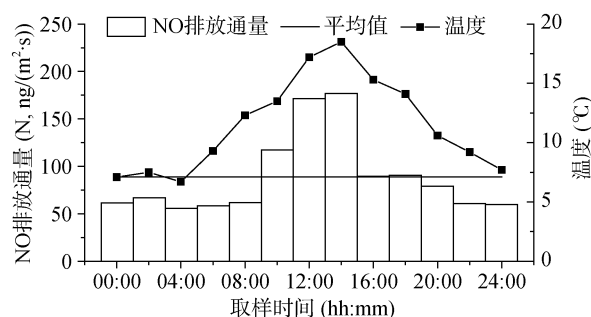
在 20 世纪 70 年代,在气相色谱得到改进后,研究人员已经把利用气相色谱分析土壤气体组分(包括 NO)作为一种常规的检测方法^[28-29]。20 世纪 70 年代末^[30],研究人员开发出化学发光法用于测定大气中 NO 的含量。化学发光法的检测下限可以达到 nL/L,经过改进后,甚至可以达到 pL/L^[31]。利用化学发光法测定 NO_x(NO + NO₂)浓度的方法包括两种^[32]:一种是利用 NO 与 O₃ 反应。在利用 O₃ 化学发光的仪器中,由一台真空泵驱动,使气流通过反应室,反应室内同时通入由高压电极产生的 O₃,NO 与 O₃ 反应转化为亚稳态的 NO₂,并产生红光及红外光。在反应室内安装反射面以使光电倍增管放大光信号,并利用红光滤波器减去 O₃ 与其他组分反应产生的可见光;在另一种方法中,主要是利用鲁米诺(C₈H₇N₃O₂)与 NO₂ 反应发光,测定 NO 时需要将其转化为 NO₂。

针对农田生态系统的 NO 排放测定, Zheng 等^[33]

研制了一套自动采样分析系统,可以全天连续测定土壤 NO 排放。系统的基本原理是,从安装在田间的规格为 70 cm × 70 cm × 90 cm 的密闭箱中每 5 min 自动采集 1 次空气样品,经脱水干燥后输送至实验室内,然后测定气体样品中 NO 的含量^[33]。本研究组在 2005—2006 年冬小麦生育期内,利用密闭室法测定了土壤 NO 的排放量。在每个试验小区内,采用自行设计的一个内径为 38 cm 高 65 cm 的 UPVC 材质的圆柱型半开放微区罩来收集 NO;而在小区中埋入土壤 35 cm 深,其内径与微区罩一样的微区桶,其上沿高出地表约 15 cm。收集土壤排放的 NO 时,把上述微区罩扣在设置的微区桶上,用透明胶带将二者密闭连接。在密闭采集 30 min 后,用一台真空泵将微区罩内的气体抽入 5 L 的真空气袋中。然后利用氮氧化物分析仪测定气袋中 NO 的含量。从施肥当天开始至施肥后第 10 日每日采集 1 次气体样品,此后大约每 2 周采集 1 次。每日的取样时段为 15:00 时至 16:00 时(图 1)。根据方程(1)计算土壤 NO 排放通量:

$$F = \rho HC \frac{273}{273 + T} \frac{1}{t} \quad (1)$$

式中, F 为 NO 排放通量, N mg/(m²·h); ρ 为 NO 在标准状态下的密度, g/L; H 为气室高度, m; C 为 NO 含量, cm³/m³; t 收集时长, h; T 温度, °C。试验结果显示,施氮小区 NO 排放量为 N 2.8 ~ 8.7 kg/hm²;施肥引起的 NO 排放因子平均为 2.4%。这与 Zheng 等^[33]报道的测定结果相近:太湖地区稻麦轮作下非淹水期施肥土壤 NO 排放量为 N 4.2 ~ 5.6 kg/hm²;包括配施有机肥的小区在内土壤 NO 排放因子平均为 2.0%,对于仅施用无机肥的小区,其 NO 排放因子较高,平均为 2.19%。这表明本研究组针对土壤 NO 排放的测定与试验研究而设计的采样与测定方法是可行的。



(14:00—16:00 这段时间内的 NO 排放通量与日平均排放通量相近, 15:00—16:00 尤为接近。因此, 选择每日的 15:00—16:00 作为 NO 的测定时段)

图 1 麦田土壤 NO 排放通量的日变化模式

Fig. 1 Diurnal dynamic of NO emission from the wheat field

3 土壤 NO 排放量

3.1 土壤 NO 排放通量观测结果：华北平原与南方稻田

土壤 NO 排放具有明显的地域分布特征。据 Wang 等^[34]报道,7 月份,华北平原 NO 平均排放通量最高,通常均高于 $N\ 40\ ng/(m^2 \cdot s)$ 。华北平原是我国最重要的农业产区,农作物以旱地作物为主,如玉米和经济作物,这些作物通常需要施用大量的氮肥。东北平原也是我国一个重要的农业产区,农作物以小麦和大豆为主。东北平原 NO 平均排放通量约为 $N\ 20\ ng/(m^2 \cdot s)$,显著低于华北平原。这可能是由于与华北平原相比,东北平原氮肥施用量和土壤温度均较低。在我国东部,淮河两侧土壤 NO 排放量呈现明显的差异,北部很高而南部很低。南部属于北亚热带区,农作物以水稻为主,而北部属于温带区,农作物以旱地作物为主。稻田由于长时间处于淹水状态,因而 NO 排放量较低。而且,土壤 NO 排放还呈现明显的季节分布特征。据估算^[34],春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)和冬季(12—2 月)土壤 NO 排放量分别占全年排放总量的 20.3%、64.4%、10.3% 和 5.0%。

3.2 土壤 NO 排放总量估算结果：中国与全球

由于估算方法不同,再加上测定结果有限,不同研究土壤 NO 排放量估算结果间存在很大的差异。例如,在利用经验模型研究全世界土壤 NO_x 排放时,Yienger 和 Levy^[7]报道,中国和日本土壤 NO_x 总排放量为 $N\ 0.31\ Tg/a$,其中农业土壤为 $N\ 0.22\ Tg/a$ 。相比之下,Wang 等^[34]报道的结果却明显较高:我国农业土壤 NO 年排放总量大约为 $N\ 0.66\ Tg/a$,相当于全世界农业土壤 NO 排放总量($N\ 5.6\ Tg/a$)的 11.7%。再如,Stehfest 和 Bouwman^[35]的估算结果显示,全世界农业土壤 NO 年排放量为 $N\ 1.8\ Tg$ 。这个结果与 Bouwman 等^[36]报道的结果—— $N\ 1.6\ Tg/a$ 相近,但是却显著低于 Galloway 等^[37]报道的结果—— $N\ 2.6\ Tg/a$,更显著低于 Davidson 和 Kingerlee^[38]的估算结果—— $N\ 5\ Tg/a$ 。

4 影响土壤 NO 排放的主要因素

土壤 NO 排放涉及一系列复杂的生物化学变化和物理迁移与交换等动态过程。这其中不仅包括硝化-反硝化等物质变化与反应,而且还包括产生的 NO 气体在土壤、空气等介质中的迁移与扩散等过程^[8,39]。因此,影响 NO 的排放的因素很多,而总结文献报道的影响因素主要有土壤温度、土壤水分含

量、土壤质地、施肥和耕作等几个方面。

4.1 土壤温度

土壤温度显著影响 NO 的排放。许多研究结果均表明,在土壤含水率一定的条件下,土壤 NO 排放与土壤温度呈指数正相关关系^[40-42]。原因在于,在其他因素(如反应基质和土壤含水率)未受到限制的情况下,酶促反应速率随温度的升高呈指数增长的趋势^[43]。在田间条件下,土壤温度对 NO 排放的影响主要体现在两个方面: NO 排放具有明显的日变化规律。土壤 NO 排放表现出日间极大值型和夜间极大值型 2 种规律性的日变化形式^[44]。前者发生在温度比较适中,但植物生长较弱的情况下,此日变化形式直接与温度有关;后者发生在植物旺盛生长的情况下,且主要取决于植物对铵态氮的吸收,而与温度没有直接关系;在植物生长强弱变换的过渡期,日变化的规律性不明显^[44]。Liu 等^[40]也发现,农田土壤 NO 排放具有明显的日变化模式,而且随着温度的变化而变化。最大和最小 NO 排放分别发生在 12:00—15:00 和 0:00—3:00,前者平均比后者高 1.2 倍。NO 排放具有明显的季节变化规律。Zheng 等^[33]对温带地区稻麦轮作下非淹水期土壤 NO 排放的测定结果表明,3 月至 6 月施氮小区及未施氮小区土壤 NO 平均排放通量分别为 11 月至 12 月对应小区的 3.9 ~ 6.3 倍;而 1 月至 2 月,由于土壤温度极低抑制了生物硝化反硝化反应的发生,因此未检测到土壤 NO 排放。

4.2 土壤水分含量

土壤水分可从多个途径影响 NO 的排放,例如,可以通过调节硝化细菌和反硝化细菌的活性,从而决定是硝化反应还是反硝化反应占主导地位;显著影响基质的产生以及基质和产物在土壤中的迁移;显著影响 NO 在土壤中的产生和消耗过程^[45]。在研究土壤水分含量对 NO 排放的影响时,土壤水分含量通常可表示为土壤重量含水率和土壤孔隙充水率(water-filled pore space, WFPS),后者定义为土壤体积含水量占土壤孔隙度的百分比。由于 WFPS 能较直接地反映土壤通气状况,而且不随土壤质地和结构的变化而变化,因此,WFPS 通常被认为是最适宜于评价土壤 NO 排放水分效应的指标之一。然而,关于 WFPS 对土壤 NO 排放的影响,文献报道的结果并不完全一致。例如,Meijide 等^[46]发现,土壤 NO 排放可能与 WFPS 间具有显著的负相关关系($r = -0.74$, $P < 0.001$),这与 Skiba 等^[47]报道的结果一致。但是,Schindlbacher 等^[48]却发现,WFPS 对土壤 NO 排放具有显著的正效应。实际上,这些研究结果相互并不

矛盾,它们只是反映了WFPS在不同范围内对土壤NO排放的不同影响。当WFPS较大时,由于NO排放主要来源于硝化过程,因此将随土壤含水率的增加而减少^[47];而当WFPS较小时,提高土壤含水率有助于缓解微生物受到的水分胁迫,从而增加土壤NO的排放^[40]。然而,当WFPS极大或极小时,土壤NO排放均减少。原因可能在于:土壤含水率较低时,尽管土壤通气状况较好,氧气供应充足,但是反应底物铵态氮的传输速率较低,因而降低了硝化反应速率;相反,土壤含水率较高时,反应底物的传输速率虽然较快,但是土壤通气状况较差,导致氧气供应不足,而且气体扩散也受到限制,从而也导致了硝化反应速率的降低^[49]。这些结果还表明,当WFPS处于某一特定水平时,土壤NO排放可以达到最大值^[50]。在不同的土地利用方式下,最大NO排放对应的最适WFPS并不相同,其变化范围一般介于15%~65%^[48]。然而,在土壤类型一定的情况下,最大NO排放对应的最适土壤含水率并不发生变化,而且与土壤温度无关^[42]。

4.3 降雨

降雨影响土壤温度和水分含量,因而影响土壤中NO的产生过程及其在土壤中的迁移。Liu等^[40]发现,不足10 mm的小雨可以增加土壤NO排放,但是大雨或者持续降雨及灌溉都可能减少NO的排放。研究认为,在旱季,小雨可以缓解微生物群落受到的水分胁迫,从而增加NO的排放。而持续降雨或大雨及灌溉则显著增加土壤水分含量,使反硝化作用占主导地位,反硝化作用的主要产物为氮气,从而导致NO排放的减少^[40]。Pang等^[41]则把大雨过后高土壤含水率条件下土壤NO排放减少的原因归结为:土壤孔隙充水抑制NO的迁移;降雨降低表层土壤温度;降雨把氮肥冲刷至深层土壤和降雨改变土壤微生物群落结构等。

4.4 土壤质地

土壤质地影响土壤通气状态和水分含量,因而影响硝化和反硝化作用的相对强弱及NO在土壤中的扩散速率。通过对11个土系的13个土壤(从排水性差的粉质黏壤土到排水良好的砂质壤土)NO排放量的测定,Skiba和Ball^[51]发现,含砂量最高的排水良好的砂质壤土(82%砂、8%粉砂和10%黏土),其NO排放通量最高,在5月氮肥施用后和10月作物收获后分别为 $N\ 74$ 和 $215\ \mu g/(m^2 \cdot h)$,而其他土壤NO排放通量均较小,其变化范围 $N\ 0.3 \sim 10\ \mu g/(m^2 \cdot h)$ 。但是,由于NO产生过程与土壤温度、土壤含水量和土壤无机氮

含量之间复杂的交互作用,NO排放通量与土壤质地间的关系非常弱^[51]。在孟加拉国进行的一个研究中,研究人员比较了3种土壤(砂质壤土、粉质壤土和黏质壤土)的NO排放^[52]。研究结果显示,砂质壤土和粉质壤土NO排放高峰均比黏质壤土早2日;砂质壤土NO排放总量($N\ 297.9\ g/hm^2$)略高于黏质壤土($N\ 272.8\ g/hm^2$),两者均远高于粉质壤土($N\ 39.9\ g/hm^2$)。黏质壤土NO排放量较高可能部分地与在 O_2 受限的条件下氨氧化细菌利用中间产物 NO_2^- 作为电子受体的还原过程有关^[52]。

4.5 土壤pH值

土壤pH值对NO排放的影响主要体现在如下两个方面:首先,土壤pH值是决定NO形成机制的重要因素。Remde和Conrad^[16]研究发现,在好氧条件下,在微碱性(pH 7.8)始成土中,NO主要来源于硝化反应,而在酸性(pH 4.7)始成土中,NO则主要来源于反硝化作用。研究认为,碱性土壤NO的产生受硝化细菌支配,而酸性土壤NO的产生受反硝化细菌支配的原因可能在于,这两种土壤中微生物群落不同;碱性土壤显然包括一个活跃的反硝化细菌群,而酸性土壤则不然^[16]。其次,土壤pH值影响硝化反应速率。Cheng等^[53]研究发现,土壤pH值是决定土壤硝化反应动力学的最重要的因素;对于酸性到中性土壤,净硝化反应速率符合零阶反应模式;而对于中性到碱性土壤,净硝化反应速率符合一阶反应模式;在同一土壤中,硝化反应速率和NO排放量均随土壤pH值的升高而增加。在韩国进行的一个研究中,Das等^[54]也发现,大白菜地NO排放通量与土壤pH值呈显著正相关关系($P < 0.01$)。

4.6 施肥

施肥是影响土壤NO排放的主要因素之一^[55]。氮肥施用可以显著促进土壤NO的排放。例如,Mei等^[26]发现,在我国的蔬菜地中,施氮小区NO排放通量平均为未施氮小区的21倍($P < 0.001$);NO排放高峰通常发生在氮肥施用后不久。原因在于,施用氮肥可以提高土壤有效氮的含量,刺激生物硝化反硝化反应的发生,从而增加土壤NO的排放^[36]。而且,随着氮素施用量的增加,土壤NO排放量也显著增多^[46]。Pang等^[41]通过对我国蔬菜地NO排放通量的研究发现,土壤铵态氮的含量与NO排放量间具有很好的相关性(卷心菜、大蒜和小萝卜的 R^2 分别为0.81、0.73和0.69, $n = 16$)。这表明,在蔬菜地中,硝化反应是最主要的NO产生过程^[56]。NO排放量不仅取决于肥料量而且还取决于其化学组成^[57-58]。各种肥料具有不

同的化学组成(如可溶性碳、氮化合物),对硝化和反硝化反应具有不同的影响,因而影响土壤 NO 的排放^[55]。一般认为,与无机肥相比,有机肥可以减少土壤 NO 的排放^[46,58]。Meijide 等^[46]比较了 4 种有机肥和尿素对地中海地区非灌溉农田 NO 排放的影响。4 种有机肥包括:未处理的猪粪(untreated pig slurry)、消解了的猪粪(digested pig slurry)、市政固体废弃物(municipal solid waste)和作物残渣堆肥+污泥(composted crop residue mixed with sewage sludge)。研究结果表明,与无机肥(NO 排放量为 $N\ 61.86\ g/hm^2$)相比,4 种有机肥中的 3 种(不包括作物残渣堆肥+污泥处理)均减少了 NO 的排放($N\ 28.82 \sim 44.48\ g/hm^2$);与消解了的猪粪相比,未处理的猪粪产生较少的 NO^[46]。研究认为,在高 WFPS 的条件下,有机肥中大量易溶的有机碳化合物促进了 NO 的消耗^[46]。这与 Zheng 等^[33]、Sanchez-Martin 等^[59]和 Fangueiro 等^[60]的发现均一致,他们也观察到易分解有机碳源的加入可以减少土壤 NO 的排放。除了土壤 NO 排放通量外,不同类型的肥料还强烈影响 NO 的排放特征^[61]。除了氮肥施用量和肥料类型,氮肥施用方式也显著影响土壤 NO 的排放。在日本进行的一个田间试验中,Hou 和 Tsuruta^[62]比较了两种氮肥施用方式对 NO 排放的影响。研究发现,与尿素条施相比,尿素表施 NO 的排放量显著增加^[62]。Hosen 等^[63]研究了尿素深施对 NO 排放的影响。研究结果显示,尿素施用于 $0.1 \sim 0.2\ m$ 深度时,NO 排放量比尿素施用于 $0 \sim 0.1\ m$ 深度时少 2%。施肥与其他因素的交互作用也显著影响土壤 NO 的排放。Mei 等^[26]研究发现,在一个蔬菜生育期内,NO 排放总量与季平均土壤温度和氮肥施用量的乘积呈指数正相关关系($R^2 = 0.87, P < 0.001$)。NO 的排放因子平均为 0.51%,其单季变化范围为 0.05%~1.24%,与季平均土壤温度和氮肥施用量的乘积呈线性正相关关系($R^2 = 0.58, P < 0.01$)^[26]。

4.7 耕作

耕作促进土壤有机氮的矿化,从而导致土壤无机氮含量的增加,因而有利于土壤 NO 的排放^[64]。Lee 等^[65]研究发现,在常规耕作方式下,灌溉玉米田 NO 排放量比少耕耕作方式下高 2~4 倍。在美国进行的一个研究中,Liu 等^[66]测定了常规和免耕两种耕作方式下土壤 NO 的排放量。研究结果显示,在两个玉米生育期,常规耕作方式下单位氮素施用量增加的 NO 排放量分别为 $N\ 3.6$ 和 $7.4\ g/hm^2$,而免耕耕作模式下分别为 $N\ 1.6$ 和 $2.0\ g/hm^2$ 。在休耕期,常规耕作模式 NO 排放量也显著高于免耕耕作模式。因而,与常

规耕作模式相比,免耕耕作模式可以显著减少玉米田 NO 排放^[66]。在长江三角洲稻麦轮作下非稻季进行的一个研究中,Yao 等^[67]也发现,免耕使土壤 NO 排放量显著减少了 48%($P < 0.01$);与常规的管理措施(传统耕作+秸秆不还田)相比,免耕与秸秆还田相结合可以使 NO 排放量显著减少 45%($P < 0.05$)。研究认为,免耕由于可以减少最初 1~2 个月的水分蒸发,因而可以提高土壤水分含量;既然土壤孔隙充水比例较高,较高的土壤水分含量抑制气体在土壤中的扩散,而且,由于降低了土壤中氧气含量,易分解有机物向 CO_2 的转化也受到了抑制,因而,免耕将促进土壤中反硝化反应的发生,这将增加 NO 在反硝化过程中的消耗^[67]。

5 土壤 NO 排放减排对策

5.1 改变氮肥类型

Slemr 和 Seiler^[68]研究发现,施用尿素的土壤其 NO 排放量是施用硝酸铵的 5 倍;因此,将铵态氮肥和尿素换成硝酸铵将有助于减少 NO 的排放。而且,这也有助于减少 NH_3 挥发和 N_2O 的排放。尽管如此,由于尿素的价格比硝酸铵低很多,是亚洲和南美国家主要使用的氮肥,因而必须要制定相应的政策措施以改变当地的肥料结构。在美国进行的一个研究中,研究人员比较了玉米田施用无水氨和尿素后 NO 的排放^[69]。研究结果显示,与尿素相比,无水氨可以显著减少 NO 的排放^[69]。当土壤 NO 排放主要来源于生物硝化反应过程时,在中性或碱性土壤中施入硫酸铵可以降低土壤 pH 值,抑制土壤中生物硝化反应的发生,从而可以减少 NO 的产生及排放^[70]。Zheng 等^[33]研究发现,与纯化肥相比,利用有机氮肥替代 16% 的合成氮肥可以使土壤 NO 排放减少 25%。

5.2 施用新型肥料

在施肥的同时加入硝化抑制剂以及利用聚合物包膜肥料均可以显著减少 NO 的排放^[71]。硝化抑制剂可以通过抑制硝化反应,减少随后的反硝化反应,从而可以减少 NO 的排放及氮素淋溶损失^[72-73]。对于多种硝化抑制剂(如双氰铵 DCD、二甲基苯基嘧啶 DMPP 及三氯甲基吡啶等)及土地利用方式,硝化抑制剂的作用比较一致:与传统的化肥相比,硝化抑制剂可以显著减少土壤 NO 的排放^[71]。这表明,可以利用硝化抑制剂作为减少土壤 NO 排放的有效措施^[71]。但是,管理措施和土壤条件都可能影响硝化抑制剂的效果^[74]。包膜肥料的养分需要透过半渗透膜扩散释放。因此,其释放速率受到薄膜的材质及厚度的控制。

当包膜肥料的养分释放与植物需求同步时,包膜肥料可以减少 NO 的排放^[75]。然而,包膜肥料对土壤 NO 排放的影响并不一致:对于排水不良的潜育土,包膜肥料非常有效,但是对于排水良好的火山灰旱地土却不起作用^[71]。

5.3 优化水肥管理措施

选择适宜的水肥管理措施,可以显著降低 NO 排放量。土壤含水量较高时施肥可以显著降低 NO 排放量,因此可以结合降雨施肥并注意施肥与灌溉的配合^[76]。在华北地区进行的一个研究表明,与常规措施相比,通过减少氮素施用量结合喷灌可以在维持粮食产量的同时显著减少 NO 排放^[77]。施肥方式和时期影响氨挥发和植物的氮素吸收效率,因而影响硝化反硝化反应基质的有效性。与表施相比,水面下施用氮肥会导致较低的 NO 排放^[78]。因此,必须使稻田晒田与化肥施用间隔一段时间。近来有模型表明,NO 产生的深度对其排放量有很大的影响,而且其排放量能通过肥料深施大大减小^[79]。Hosen 等^[63]后来的试验也证实了这一点。

5.4 主要减排区域及主要农田类型

我国农业土壤 NO 排放集中分布在两个主要的农业区^[34]。横跨江苏、安徽、山东和河北数省的华北平原是 NO 排放量最高的一个区域。另一个重要的 NO 排放区域为由辽宁、吉林和黑龙江 3 省大部组成的东北平原。由于氮肥施用量较高和适宜的气候条件,旱地作物玉米、经济作物和小麦的 NO 排放量均明显较高^[34]。

6 结论与展望

农业土壤 NO 的产生与排放是一个极其复杂的过程,这些过程受环境条件、土壤性质和农业管理措施等因素的显著影响。在我国,相当一部分农田氮肥施用量很高,在一些经济发达的地区氮肥年施用量甚至高达 $N\ 600\text{ kg/hm}^2$ 。如此高的氮肥施用量导致非常低的氮肥利用率和显著的氮素损失。由于可能引起严重的环境恶化,因而氮素损失已经引起国内外极大的关注。然而,到目前为止,我国开展的关于农业土壤 NO 排放的研究工作仍然非常有限。因此,针对我国不同的土壤类型和土地利用方式,开展相关的研究显得十分必要。这些研究应该集中在如下几个方面:

农业土壤 NO 的产生与排放机制的深入研究; 农业生态系统 NO 排放模型研究中关键参数的确定及主要参数对土壤 NO 排放影响的综合研究; 建立受土壤性质、气候条件及农业生产措施综合影响的农田生

态系统 NO 排放模型,估算农业土壤 NO 的排放总量和时空分布; 基于上述研究提出减少农业土壤 NO 排放的措施。

致谢:刘丽和蒋云芳两位同志协助查阅和收集了部分文献,笔者在此谨表谢意!

参考文献:

- [1] Khan S, Clough TJ, Goh KM, Sherlock RR. Influence of soil pH on NO_x and N_2O emissions from bovine urine applied to soil columns[J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 2011, 54(4): 285–301
- [2] Anderson IC, Levine JS. Relative rates of nitric oxide and nitrous oxide production by nitrifiers, denitrifiers, and nitrate respirers[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1986, 51(5): 938–945
- [3] Vitousek PM, Mooney HA, Lubchenco J, Melillo JM. Human domination of earth's ecosystems[J]. Science, 1997, 277(5 325): 494–499
- [4] Wayne RP. Chemistry of Atmospheres[M]. Oxford, UK: Clarendon Press/Oxford University Press, 1993
- [5] IPCC. Climate Change 1995[M]. Cambridge, 1996
- [6] Conrad R, Smith KA. Soil microbial processes and the cycling of atmospheric trace gases[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A: Physical and Engineering Sciences, 1995, 351(1 696): 219–230
- [7] Yienger JJ, Levy HI. Empirical model of global soil-biogenic NO_x emissions[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100(D6): 11 447–11 464
- [8] McNeill A, Unkovich M. The nitrogen cycle in terrestrial ecosystems // Marschner P, Rengel Z. Nutrient Cycling in Terrestrial Ecosystems[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2007: 37–64
- [9] Hooper AB. Nitrogen oxidation and electron transport in ammonia-oxidizing bacteria // Schlessinger D. Microbiology-1978[M]. Washington, DC: American Society for Microbiology, 1978: 299–304
- [10] Fernandez LA, Bedmar EJ, Sagardoy MA, Gomez MA. Denitrification activity in soils for sustainable agriculture // Maheshwari DK. Bacteria in Agrobiolgy: Plant Nutrient Management[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011: 321–338
- [11] Hutchinson GL, Davidson EA. Processes for production and consumption of gaseous nitrogen oxides in soil[J]. ASA Special Publication, 1993, 55: 79–93
- [12] Cui F, Yan GX, Zhou ZX, Zheng XH, Deng J. Annual emissions of nitrous oxide and nitric oxide from a wheat-maize cropping system on a silt loam calcareous soil in the North China Plain[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 48: 10–19
- [13] Hutchinson GL, Guenzi WD, Livingston GP. Soil water controls on aerobic soil emission of gaseous nitrogen oxides[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1993, 25(1): 1–9
- [14] Stohl A, Williams E, Wotawa G, Kromp-Kolb H. A European inventory of soil nitric oxide emissions and the effect of

- these emissions on the photochemical formation of ozone[J]. *Atmospheric Environment*, 1996, 30(22): 3 741–3 755
- [15] Russow R, Spott O, Stange CF. Evaluation of nitrate and ammonium as sources of NO and N₂O emissions from black earth soils (Haplic Chernozem) based on ¹⁵N field experiments[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(2): 380–391
- [16] Remde A, Conrad R. Role of nitrification and denitrification for NO metabolism in soil[J]. *Biogeochemistry*, 1991, 12(3): 189–205
- [17] Göttsche M, Conrad R. Influence of soil properties on the turnover of nitric oxide and nitrous oxide by nitrification and denitrification at constant temperature and moisture[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 32(2): 120–128
- [18] Mckenney DJ, Drury CF. Nitric oxide production in agricultural soils[J]. *Global Change Biology*, 1997, 3(4): 317–326
- [19] Nelson DW. Gaseous losses of nitrogen other than through denitrification // Stevenson FJ. *Nitrogen in Agricultural Soils*[M]. Madison: ASA, CSSA and SSSA, 1982: 327–363
- [20] Paul EA, Clark FE. *Soil Microbiology and Biochemistry* [M]. New York: Academic Press, 1989
- [21] Blackmer AM, Cerrato ME. Soil properties affecting formation of nitric oxide by chemical reactions of nitrite[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(5): 1 215–1 218
- [22] Davidson EA. Sources of nitric oxide and nitrous oxide following wetting of dry soil[J]. *Soil Science Society of America, Proceedings*, 1992, 56(1): 95–102
- [23] Chalk P, Smith C. Chemodenitrification // Freney JR, Simpson JR. *Gaseous Loss of Nitrogen from Plant-soil Systems*[M]. Hague: Martin Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers, 1983: 65–89
- [24] Parrish DD, Williams EJ, Fahey DW, Liu SC, Fehsenfeld FC. Measurement of nitrogen oxide fluxes from soils: intercomparison of enclosure and gradient measurement techniques[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(D2): 2 165–2 171
- [25] Delany AC, Fitzjarrald DR, Lenschow DH, Pearson R, Wendel GJ, Woodruff B. Direct measurements of nitrogen oxides and ozone fluxes over grassland[J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1986, 4(4): 429–444
- [26] Mei BL, Zheng XH, Xie BH, Dong HB, Zhou ZX, Wang R, Deng J, Cui F, Tong HJ, Zhu JG. Nitric oxide emissions from conventional vegetable fields in southeastern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(17): 2 762–2 769
- [27] Roelle P, Aneja VP, O'Connor J, Robarge W, Kim DS, Levine JS. Measurement of nitrogen oxide emissions from an agricultural soil with a dynamic chamber system[J]. *Journal of Geophysical Research D Atmospheres*, 1999, 104: 1 609–1 619
- [28] Bremner JM, Blackmer AM. Composition of soil atmospheres // Page AL. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Agronomy Monograph*[M]. Madison, WI: ASA and SSSA, 1982: 873–901
- [29] Smith KA, Arah JRM. Gas chromatographic analysis of the soil atmosphere // Smith KA. *Soil Analysis: Modern Instrumental Techniques*[M]. New York: Marcel Dekker, Inc., 1991: 505–546
- [30] Galbally IE. *Measurement of Nitrogen Oxides in the Background Atmosphere*[C]. Geneva: World Meteorological Organization, 1977
- [31] Dickerson RR, Delany AC, Wartburg AF. Further modification of a commercial NO_x detector for high sensitivity[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1984, 55(12): 1 995–1 998
- [32] Mulvaney RL. Advances in methodology for research on nitrogen transformations in soils // Schepers JS, Raun WR. *Nitrogen in Agricultural Systems*[M]. Madison, WI: ASA, CSSA and SSSA, 2008: 437–504
- [33] Zheng X, Huang Y, Wang Y, Wang M. Seasonal characteristics of nitric oxide emission from a typical Chinese rice-wheat rotation during the non-waterlogged period[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(2): 219–227
- [34] Wang QG, Han ZW, Higano Y. An inventory of nitric oxide emissions from soils in China[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 135(1): 83–90
- [35] Stehfest E, Bouwman L. N₂O 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
- [36] Bouwman AF, Boumans LJM, Batjes NH. Modeling global annual N₂O and NO emissions from fertilized fields[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(4): 1 080
- [37] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, et al. Nitrogen cycles: past, present, and future[J]. *Biogeochemistry*, 2004, 70(2): 153–226
- [38] Davidson EA, Kinglerlee W. A global inventory of nitric oxide emissions from soils[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 48(1): 37–50
- [39] Fowler D, Pilegaard K, Sutton MA, Ambus P, Raivonen M, Duyzer J, Simpson D, Fagerli H, Fuzzi S, Schjoerring JK. Atmospheric composition change: Ecosystems-atmosphere interactions[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(33): 5 193–5 267
- [40] Liu C, Zheng X, Zhou Z, Han S, Wang Y, Wang K, Liang W, Li M, Chen D, Yang, Z. Nitrous oxide and nitric oxide emissions from an irrigated cotton field in Northern China[J]. *Plant and Soil*, 2010, 332(1): 123–134
- [41] Pang XB, Mu YJ, Lee XQ, Fang SX, Yuan J, Huang DK. Nitric oxides and nitrous oxide fluxes from typical vegetables cropland in China: Effects of canopy, soil properties and field management[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(16): 2 571–2 578
- [42] Yu J, Meixner FX, Sun W, Liang Z, Chen Y, Mamtimin B, Wang G, Sun Z. Biogenic nitric oxide emission from saline sodic soils in a semiarid region, northeastern China: A laboratory study[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(G4): G04005

- [43] Ludwig J, Meixner FX, Vogel B, Forstner J. Soil-air exchange of nitric oxide: An overview of processes, environmental factors, and modeling studies[J]. *Biogeochemistry*, 2001, 52(3): 225–257
- [44] 郑循华, 王明星, 王跃思. 太湖地区农田 NO 排放不连续测量最佳时间[J]. *环境科学*, 2000, 21(1): 1–6
- [45] Davidson EA. Soil water content and the ratio of nitrous oxide to nitric oxide emitted from soil // Oremland RS. *Biogeochemistry of Global Change: Radiatively Active Trace Gases*[M]. London: Chapman and Hall, 1993: 369–386
- [46] Meijide A, Garcia-Torres L, Arce A, Vallejo A. Nitrogen oxide emissions affected by organic fertilization in a non-irrigated Mediterranean barley field[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 132(1/2): 106–115
- [47] Skiba U, Smith KA, Fowler D. Nitrification and denitrification as sources of nitric oxide and nitrous oxide in a sandy loam soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25(11): 1 527–1 536
- [48] Schindlbacher A, Zechmeister-Boltenstern S, Butterbach-Bahl K. Effects of soil moisture and temperature on NO, NO₂, and N₂O emissions from European forest soils[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(D17): D17302
- [49] Skopp J, Jawson M, Doran J. Steady-state aerobic microbial activity as a function of soil water content[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54(6): 1 619–1 625
- [50] Laville P, Lehuger S, Loubet B, Chaumartin F, Cellier P. Effect of management, climate and soil conditions on N₂O and NO emissions from an arable crop rotation using high temporal resolution measurements[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(2): 228–240
- [51] Skiba U, Ball B. The effect of soil texture and soil drainage on emissions of nitric oxide and nitrous oxide[J]. *Soil Use and Management*, 2002, 18(1): 56–60
- [52] Khalil M, Schmidhalter U, Gutser R. N₂O NH₃ and NO_x emissions as a function of urea granule size and soil type under aerobic conditions[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2006, 175(1): 127–148
- [53] Cheng W, Tsuruta H, Chen G, Yagi K. N₂O and NO production in various Chinese agricultural soils by nitrification[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(6): 953–963
- [54] Das P, Kim KH, Sa JH, Bae W, Kim JC, Jeon EC. Emissions of ammonia and nitric oxide from an agricultural site following application of different synthetic fertilizers and manures[J]. *Geosciences Journal*, 2008, 12(2): 177–190
- [55] Sanchez-Martin L, Meijide A, Garcia-Torres L, Vallejo A. Combination of drip irrigation and organic fertilizer for mitigating emissions of nitrogen oxides in semiarid climate[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 137(1/2): 99–107
- [56] Akiyama H, Tsuruta H. Effect of organic matter application on N₂O, NO, and NO₂ fluxes from an Andisol field[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(4): 1 100
- [57] Baggs EM, Rees RM, Castle K, Scott A, Smith KA, Vinten AJA. Nitrous oxide release from soils receiving N-rich crop residues and paper mill sludge in eastern Scotland[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 90(2): 109–123
- [58] Vallejo A, Skiba UM, Garcia-Torres L, Arce A, Lopez-Fernandez S, Sanchez-Martin L. Nitrogen oxides emission from soils bearing a potato crop as influenced by fertilization with treated pig slurries and composts[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(9): 2 782–2 793
- [59] Sanchez-Martin L, Vallejo A, Dick J, Skiba UM. The influence of soluble carbon and fertilizer nitrogen on nitric oxide and nitrous oxide emissions from two contrasting agricultural soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(1): 142–151
- [60] Fanguero D, Coutinho J, Cabral F, Fidalgo P, Bol R, Trindade H. Nitric oxide and greenhouse gases emissions following the application of different cattle slurry particle size fractions to soil[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 47: 373–380
- [61] Fang SX, Mu YJ. NO_x fluxes from several typical agricultural fields during summer-autumn in the Yangtze Delta, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(16): 2 665–2 671
- [62] Hou AX, Tsuruta H. Nitrous oxide and nitric oxide fluxes from an upland field in Japan: Effect of urea type, placement, and crop residues[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 65(2): 191–200
- [63] Hosen Y, Paisancharoen K, Tsuruta H. Effects of deep application of urea on NO and N₂O emissions from an Andisol[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63(2): 197–206
- [64] Skiba U, Fowler D, Smith KA. Nitric oxide emissions from agricultural soils in temperate and tropical climates: Sources, controls and mitigation options[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 48(1): 139–153
- [65] Lee J, Hopmans JW, Van Kessel C, King AP, Evatt KJ, Loutie D, Rolston DE, Six J. Tillage and seasonal emissions of CO₂, N₂O and NO across a seed bed and at the field scale in a Mediterranean climate[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 129(4): 378–390
- [66] Liu X, Mosier A, Halvorson A, Zheng F. Tillage and nitrogen application effects on nitrous and nitric oxide emissions from irrigated corn fields[J]. *Plant and Soil*, 2005, 276(1): 235–249
- [67] Yao Z, Zheng X, Xie B, Mei B, Wang R, Butterbach-bahl K, Zhu J, Yin R. Tillage and crop residue management significantly affects N-trace gas emissions during the non-rice season of a subtropical rice-wheat rotation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(10): 2 131–2 140
- [68] Slemr F, Seiler W. Field measurements of NO and NO₂ emissions from fertilized and unfertilized soils[J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1984, 2(1): 1–24
- [69] Fujinuma R, Venterea RT, Rosen C. Broadcast urea reduces

- N₂O but increases NO emissions compared with conventional and shallow-applied anhydrous ammonia in a coarse-textured soil[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2011, 40: 1 806–1 815
- [70] Martikainen PJ. Nitrification in forest soil of different pH as affected by urea, ammonium sulphate and potassium sulphate[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, 17(3): 363–367
- [71] Akiyama H, Yan X, Yagi K. Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N₂O and NO emissions from agricultural soils: meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(6): 1 837–1 846
- [72] Bolan NS, Sagar S, Luo J, Bhandral R, Singh J. Gaseous emissions of nitrogen from grazed pastures: Processes, measurements and modelling, environmental implications, and mitigation[J]. *Advances in Agronomy*, 2004, 84: 37–120
- [73] Subbarao GV, ITO O, Sahrawat KL, Berry WL, Nakahara K, Ishikawa T, Watanabe T, Suenaga K, Rondon M, Rao IM. Scope and strategies for regulation of nitrification in agricultural systems-challenges and opportunities[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2006, 25(4): 303–335
- [74] Sanz-cobena A, Sánchez-martín L, García-torres L, Vallejo A. Gaseous emissions of N₂O and NO and NO₃⁻ leaching from urea applied with urease and nitrification inhibitors to a maize (*Zea mays*) crop[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 149(0): 64–73
- [75] Shaviv A. Advances in controlled-release fertilizers[J]. *Advances in Agronomy*, 2001, 71: 1–49
- [76] Focht DD, Verstraete W. Biochemical ecology of nitrification and denitrification[J]. *Advances in Microbial Ecology*, 1977, 1: 135–214
- [77] Liu CY, Wang K, Meng SX, Zheng XH, Zhou ZX, Han SH, Chen D, Yang ZP. Effects of irrigation, fertilization and crop straw management on nitrous oxide and nitric oxide emissions from a wheat–maize rotation field in northern China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 140(1/2): 226–233
- [78] Bouwman AF. The role of soils and land use in the greenhouse effect[J]. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1989, 37: 13–19
- [79] Hosen Y, Tsuruta H, Minami K. Effects of the depth of NO and N₂O productions in soil on their emission rates to the atmosphere: Analysis by a simulation model[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 57(1): 83–98

Investigation on NO Emission from Agricultural Soils

CAO Yan-sheng^{1,2}, TIAN Yu-hua¹, YIN Bin^{1*}, ZHU Zhao-liang¹

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences)*, Nanjing 210008, China; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, China)

Abstract: This paper reviewed the recent research progresses in NO emission from agricultural soils, including formation mechanism of NO, collection and measurement methods, emission amount, main influence factors on NO emission, and mitigation practices for NO emission. On this basis, it is suggested that during a future period investigation on NO emission from agricultural soils in China should be still focused on production and emission mechanism of NO, quantitative correlation between main influencing factor and NO emission, estimation of NO emission in different areas by means of modeling NO emission from agricultural soils. Some optimum practices for reducing NO emission were also proposed in this paper.

Key words: NO, Formation mechanism, Measurement method, Emission amount, Influencing factor, Mitigation practice