不同种类有机肥施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的综合影响

邹建文[1] ,黄耀[1,2*] ,宗良纲[1] ,王跃思[2] , Ronald L . Sass[3] (1 .南京农业大学资源与环境科学学院 ,南京 210095 ,E- mail :huangy @ njau .edu .cn . ; 2 .中国科学院大气物理研究所 ,北京 100029 ; 3 .美国莱斯大学生态与进化生物学系 ,德克萨斯 77005-1892)

摘要 :以麦茬稻田为对象 ,研究基肥施用不同有机肥对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的综合影响 .结果表明 :有机肥施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的季节变化模式无明显影响 ,但影响其排放量 .与施用化肥(化肥处理) 相比 ,施用菜饼 + 化肥(菜饼处理) 促进 CH_4 和 N_2O 的排放 ,其季节排放总量分别增加了 252 %和 22 % ;施用小麦秸秆 + 化肥(秸秆处理) 和牛厩肥 + 化肥(牛厩肥处理) 明显增加 CH_4 排放 ,增加量分别为 250 %和 45 % ,同时却减少 N_2O 排放 ,分别减少 18 %和 21 % ;施用猪厩肥 + 化肥(猪厩肥处理) 降低 CH_4 和 N_2O 的排放 ,分别降低 4 %和 18 % .对 CH_4 和 N_2O 排放的综合温室效应分析表明 ,菜饼和秸秆处理的全球增温潜势(GWP) 约为化肥处理的 2 .5 倍 ,牛厩肥和化肥处理基本持平 ,但施用猪厩肥可减少 10 % ~ 15 % .各处理的 GWP 从高到低依次为菜饼 、秸秆 、牛厩肥 、化肥和猪厩肥 .单位产量的 GWP 以秸秆处理最高 ,菜饼次之 ,牛厩肥比化肥处理略高 ,猪厩肥处理最低 .从本生长季来看 ,猪厩肥的施用对于实现环境效益与生产效益的协调发展具有一定作用 .

关键词 :稻田 ;有机肥 ; CH_4 ; N_2O ;全球增温潜势
中图分类号 : X511 文献标识码 : A 文章编号 :0250-3301(2003) 04-06-0007

Integrated Effect of Incorporation with Different Organic Manures on CH_4 and N_2O Emissions from Rice Paddy

Zou Jianwen[1] , Huang Yao[1,2] , Zong Lianggang[1] , Wang Yuesi[2] , Ronald L . Sass[3] (1 . College of Resources and Environmental Sciences , Nanjing Agricultural University , Nanjing 210095 , China E- mail : huangy @njau .edu .cn . , China ; 2 . Institute of Atmospheric Physics , Beijing 100029 , China ;3 . Department of Ecology and Evolutionary Biology , Rice University , Houston , TX 77005-1892 , USA)

Abstract : Field experiment was conducted in 2001 rice growing season to understand the effect of organic manure application on CH_4 and N_2O emissions . Five treatments of fertilizer including urea and NH_4HCO_3 used as chemical fertilizer (CF) , chemical fertilizer + pig manure (CF + PM) , chemical fertilizer + cow manure (CF + CM) , chemical fertilizer + rapeseed cake (CF + RC) and chemical fertilizer + wheat straw (CF + WS) were dedicated to this experiment . Results from the field observations indicated that application of the organic manure did not change the seasonal pattern of CH_4 and N_2O emissions but significantly affected the seasonal amounts . Seasonal amount of CH_4 emission from the treatments of CF + CM , CF + RC and CF + WS was respectively 45 % , 252 % and 250 % higher than that from the treatment of CF , but the application of pig manure (CF + PM) did not significantly influence the CH_4 emission . The N_2O emissions , on the other hand , were reduced by 18 % , 21 % and 18 % for the treatments of CF + PM , CF + CM and CF + WS , respectively . Incorporation of rapeseed cake enhanced the N_2O emission , yielding an increment of 22 % . On a time scale of 20-year period , the integrated global warming potential (GWP) of CH_4 + N_2O released during the rice growing season for the treatments of CF + RC , CF + WS and CF + CM was respectively 154 % , 136 % and 17 % higher

基金项目 :中国科学院“百人计划”项目 ,美国航天航空总署 TECO/ NASA 资助项目
作者简介 :邹建文(1971 ~) ,男 ,博士研究生 ,主要研究方向为农田生态系统碳氮循环与全球变化 .
收稿日期 :2002-09-08 ;修订日期 :2002-12-12
* 通讯联系人

than that for the CF treatment, while a reduction of 10 % was obtained for the CF + PM treatment. The calculation of the GWP per unit rice grain yield suggested that the application of pig manure took the slight advantages not only in reducing the GWP but also in improving the grain yield.

Keywords: rice paddy; organic manure; CH_4 and N_2O emissions; global warming potential

稻田是大气 CH_4 和 N_2O 的重要排放源.来源于稻田的 CH_4 占大气 CH_4 总来源的 12 %左右[1].根据最新资料估计,全球稻田 CH_4 年总排放量达到 30 Tg(20 ~ 40 Tg,1 Tg = 10^{12} g)[2].研究表明,大气中增加的 N_2O 70 % ~ 90 %来自于地表生物源,全球由于化肥施用而从农田排放的 N_2O-N 达 2 ~ 3 Tg/a[3],约占全球生物源排放 N_2O-N 总量的 21 % ~ 46 %.因此稻田 CH_4 和 N_2O 产生与排放的研究受到各国科学家的重视.

我国是水稻种植大国,水稻总产量占全球的 34 %,排世界首位,种植面积占全球的 22 %.我国在稻田的施肥方面以有机、无机配施为特征;稻田水分管理以淹水和烤田相结合的常规灌溉为主.因此,研究在常规灌溉条件下有机、无机肥配施对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的综合影响,对认识我国稻田 CH_4 和 N_2O 排放规律、寻求稻田温室气体减排措施具有重要意义.虽然不同有机肥料对稻田 CH_4 排放影响的研究结果不尽相同[4~7],但一般认为,有机肥的施用会向稻田提供更多的 CH_4 前体,使土壤中有更多的 CH_4 产生,从而增加排放;有机肥施用对稻田 N_2O 排放的影响也有一些报道,但结果不一[8,9].而有机肥料施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的综合影响报道较少.本研究选用生产上常用的几种有机肥,并结合考虑有机肥的碳、氮含量,试图探讨外源碳、氮输入对稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放的综合影响.

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验于 2001 年在南京市江宁区秣陵镇麦茬稻试验田中进行.试验田土壤理化特性为:$pH_{(H_2O)}$ 值 6.7;有机碳 17.5 g·kg^{-1},全氮含量 1.9 g·kg^{-1};物理性粘粒含量 490 g·kg^{-1}.供试水稻品种为 9516,05-19 日播种,06-21 日移栽,36 穴·m^{-2},每穴 5 本,10-15 日收割.田间水分管理为:07-24 ~ 08-02 日为烤田期;09-10 ~ 10-05 日干湿交替,10-05 日以后落干.其余时间田间处于淹水状态.水分管理和病虫草害防治与当地大面积生产相一致.

试验设置 5 个肥料处理,分别为常规化肥(化肥处理)、菜饼 + 常规化肥(菜饼处理)、小麦秸秆 + 常规化肥(秸秆处理)、猪厩肥 + 常规化肥(猪厩肥处理)、牛厩肥 + 常规化肥(牛厩肥处理).其中常规化肥施用总量(N)为 333 kg·hm^{-2},分 3 次施用,分别为 06-20 日施碳铵和复合肥(N:P_2O_5:K_2O = 8:8:9)各为 750 kg·hm^{-2};06-28 日施尿素 150 kg·hm^{-2};07-18 日施尿素 150 kg·hm^{-2}.风干的菜饼、小麦秸秆、猪厩肥、牛厩肥于水稻栽插前等施用量 2.25 t·hm^{-2}填埋于土壤耕作层 5 ~ 10cm 处作基肥施用.各有机肥料的碳、全氮含量分别为:小麦秸秆 50.5 %、0.8 %;菜饼 51.8 %、6.5 %;牛厩肥(干基)34.9 %、1.3 %;猪厩肥(干基)43.6 %、2.2 %.

1.2 气样采集与分析

采用密闭箱-气相色谱法测定稻田 CH_4 和 N_2O 排放通量,箱体由不锈钢材料制成,规格 50cm × 50cm × 50cm(作物生长后期用 50cm × 50cm × 100cm 箱体),于水稻栽插前将不锈钢底座固定于土壤中,测定时加水注入底槽加以密封,水稻移栽后每 3 ~ 4d 采样一次,烤田期每天一次.每次采样时间固定在上午 8:00 ~ 10:00,各处理设 2 重复,采用两箱体平行采样[10],采样时间分别为关箱后的 0、5、10、15、20 min,每次抽样 60 mL.气体样品用 Agilent 4890D 气相色谱仪同时分析 CH_4 和 N_2O[11],N_2O 检测器 ECD,检测温度 330 ℃,柱温 55 ℃.CH_4 检测器 FID,检测温度 200 ℃,柱温 55 ℃.整个生育期的

测定结果表明,20 min 内的 CH_4 和 N_2O 排放浓度均呈线性积累($r^2 > 0.9$) .气体排放通量由 5 个气样浓度值经线性回归分析得出[12].积分求得全生育期 CH_4 和 N_2O 季节排放总量.

2　结果与讨论

2.1　CH_4 和 N_2O 排放通量的季节变化

从图 1 可以看出,各处理间 CH_4 排放主要集中在移栽后 35 d 内,移栽后 2 周出现 CH_4 排放高峰,烤田后 CH_4 排放通量下降.CH_4 排放的季节变化主要受水分管理控制,这与 CH_4 产生需要极端的厌氧条件相一致.不同的有机肥料施用并不影响 CH_4 的排放模式,但排放通量之间存在显著差异.对于 N_2O 排放而言,各处理间的季节变化基本相同,当田间处于淹水状态时,各处理几乎无 N_2O 排放.N_2O 高峰排放主要集中在烤田期,以后干湿交替及落干期也有部分 N_2O 排放.但不同有机肥的施用会引起 N_2O 排放通量的极大差异.本试验中,干湿交替阶段 N_2O 排放量较大的原因是此时期适逢夏季雷阵雨天气,田间一直处于湿润状态,土壤水分条件适宜于 N_2O 排放.从图 1 还可以看出,各处理 CH_4 和 N_2O 排放随着稻田水分管理而互为消长,这与其它地方的稻田 CH_4 和 N_2O 排放模式相一致[13].

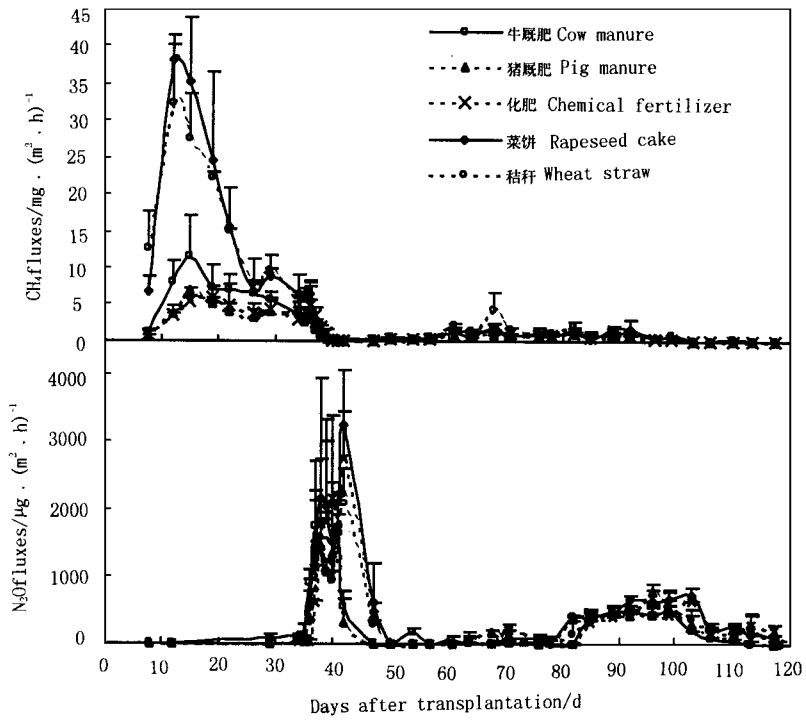

图 1　稻田 CH_4 和 N_2O 排放通量的季节变化

Fig.1　Seasonal pattern of CH_4 and N_2O emissions from rice paddy

2.2　CH_4 季节排放总量

有机肥料施用由于向土壤中输入了大量有机碳,CH_4 产生的前体增加,导致 CH_4 排放量增加.从表 1 可以看出,菜饼处理和秸秆处理 CH_4 季节排放总量分别为 137.47 kg·hm^{-2}和 136.44 kg·hm^{-2},较化肥处理 39.02 kg·hm^{-2} 分别增加了 252 %和 250 %,方差分析达极显著水平.与菜饼和秸秆相比,牛厩肥对 CH_4 排放的影响相对较小,其 CH_4 季节排放总量为 56.54 kg·hm^{-2},较化肥处理增加了 45 %.而猪厩肥处理与化肥处理几乎无差异.这可能是由于虽然猪厩肥施用向土壤输入有机碳,但由于

猪厩肥为未经堆腐的干物料,碳大部分以大分子复杂有机物存在,前期分解的中间产物和小分子有机物较少,因而可利用的产 CH_4 前体较少.而稻田中后期烤田使得土壤环境又限制了部分中间产物和小分子化合物向 CH_4 转化.同样,牛厩肥对 CH_4 排放的影响相对较小的原因除了其自身有机碳含量较低外,未完全腐熟的干物料中间产物和小分子简单化合物含量低也可能是一个重要原因.

2.3 N_2O 季节排放总量

如表 1 所示,本试验的各肥料处理间以菜饼处理 N_2O 排放量最大,全生育期排放总量为

表 1 有机肥施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放量的影响

Table 1 Effect of organic manure incorporation on the seasonal amount of CH_4 and N_2O emissions

处理	CH_4/ kg·hm^{-2}		N_2O/ kg·hm^{-2}					
	排放总量	增减率[1]/ %	烤田期		烤田后		全生育期[2]	
			排放总量	增减率/ %	排放总量	增减率 %	排放总量	增减率/ %
化肥	39.02		2.79		3.71		6.50	
菜饼	137.42	252	3.77	35	4.17	12	7.94	22
秸秆	136.44	250	2.16	- 23	3.19	- 14	5.35	- 18
牛厩肥	56.54	45	1.98	- 29	3.14	- 15	5.12	- 21
猪厩肥	37.31	- 4	1.81	- 35	3.50	- 6	5.31	- 18

1) 增减率为有机肥料处理与化肥处理相比同期排放总量增加或减少的百分数.

2) 烤田前淹水阶段无明显 N_2O 排放,因此 N_2O 排放总量:全生育期 = 烤田期 + 烤田后.

7.94 kg·hm^{-2},较化肥处理 6.50 kg·hm^{-2} 增加了 22 %.尤其在烤田期增加幅度更明显,增加了 35 %;烤田后增加幅度有所下降,为 12 %.这是因为菜饼的氮含量较高,且碳氮比窄,在土壤中分解速度快,菜饼施用初期产生 N_2O 的氮源积累多,随着分解时间的延长和作物对 N 素的利用,N 源积累量逐步下降,因此,其 N_2O 排放的增加幅度也随之降低.其它有机肥料施用,主要是通过向土壤中提供 C 素,影响土壤微生物对化肥 N 的分解来影响 N_2O 排放.由于小麦秸秆的 C/ N 比较宽,微生物在分解秸秆的初期要利用土壤中的 N 素来构成自身的体细胞,因此微生物对 N 素的争夺利用导致 N_2O 排放量的下降,全生育期秸秆处理 N_2O 排放总量为 5.35 kg·hm^{-2} 较化肥处理减少了 18 %.烤田期下降幅度(23 %)大于烤田后(14 %).这也说明了秸秆分解初期微生物对 N 素争夺利用强于后期.而牛粪和猪粪两处理的 N_2O 季节排放总量分别为 5.12 kg·hm^{-2} 和 5.31 kg·hm^{-2},较化肥处理分别减少了 21 %和 18 %.其原因可能是未经堆腐的牛粪和猪粪,施入土壤中需要经过养分的有效化过程,即矿质化过程.在此过程中微生物首先对有机碳进行分解,然后才能产生碱解氮和铵态氮等速效氮[14].在有机碳的分解过程中微生物需要利用土壤中的氮素,因而会引起 N_2O 排放量的减少.本试验表现为水稻生长前期主要进行养分的有效化过程,导致烤田期 N_2O 排放量下降幅度较大,分别下降了 29 %和 35 %,以后随着有机物料的逐步分解,可利用的 N 源渐渐积累,下降幅度降低,分别为 15 %和 6 %.从以上分析可以看出,有机肥料的腐熟程度是影响 CH_4 和 N_2O 排放的重要因素之一.

土壤 N_2O 是微生物参与的硝化反硝化产物,农田 N_2O 排放受土壤通气状况和反应底物浓度的制约.农田有机肥料的施用由于向土壤中提供了外源 C、N,有机质分解提供反硝化作用所需能量,加入的有机碳影响土壤微生物的活性,进而影响硝化反硝化作用[15].从本试验结果可以看出,有机肥料施用对稻田 N_2O 排放的影响呈现复杂性.N_2O 排放量跟有机肥料的 C、N 含量之间并不能用简单的回归方程来描述,稻田 N_2O 排放不仅受到外源 C、N 供应水平的影响,而且跟有机肥料的类型和腐熟程度有关.有研究认为有机肥料的颗粒大小和粉碎程

度、不同施用方式都会引起 N_2O 排放量的巨大差异[16~19].本研究是等重量的有机肥料的施用,因此,N_2O 排放受各种有机肥料的 C、N 含量不同的综合影响. Chadwick 等人[16]用等 C 量和等 N 量的试验设计来研究有机肥料对土壤 N_2O 排放的影响.结果表明,当有机肥料等 C 量施用时,N_2O 的排放主要受外源 N 素供应水平的制约;而当有机肥料等 N 量施用时,N_2O 排放主要受外源 C 供应水平的制约.不同的研究,由于所采用的有机肥料和试验设计及方法的不同,会导致研究结果的差异,甚至得出截然相反的结论.总体来说,稻田施用有机肥料引起 N_2O 排放量的差异,应该受外源 C、N 供应水平、土壤供 N 水平、微生物对有机碳的分解及对 N 的争夺利用、作物对 N 素利用等因素制约.因此,有关有机肥料施用对土壤 N_2O 排放影响的机理尚需进一步深入研究.

2.4　CH_4 和 N_2O 排放的综合温室效应

在 20 年时间尺度上,单位质量 CH_4 和 N_2O 的全球增温潜势 GWP(Global Warming Potential)分别为 CO_2 的 62 倍和 275 倍;500 年时间尺度其 GWP 则分别为 CO_2 的 7 倍和 156 倍(IPCC,2001).若以 CO_2 1 kg/hm^2 的 GWP 为 1,可求得各肥料处理排放 CH_4 和 N_2O 的综合 GWP(表 2).从表中可以看出,菜饼和秸秆处理的 GWP 较化肥处理在 20 年时间尺度上分别增加了 151 %和 136 %;500 年分别增加了 71 %和 39 %.牛厩肥处理在两时间尺度上较化肥处理略有增加,各处理中以猪厩肥处理 GWP 最低,在 20 年和 500 年时间尺度上较化肥处理分别减少了 10 %和 15 %.就同一处理而言,在 500 年时间尺度上的 N_2O 的 GWP 占 CH_4 GWP 的比例分别为:化肥处理 79 %,菜饼处理 56 %,秸秆处理 47 %,牛粪处理 67 %,猪粪处理 76 %.因此,稻田 N_2O 排放亦不容忽视.

在考虑稻田 CH_4 和 N_2O 排放的综合温室效应的同时,综合考虑其生产效益是十分必要的.持续农业的发展要求环境效益与生产效益的和谐统一.稻田单位产量的 GWP 这一指标能较好地反映环境效益与生产效益的协调统一性,适合于综合评价各种农业管理措施包括有机肥料施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响.表 2 表明,秸秆处理的单位产量的 GWP 最大;菜饼处理次之;牛厩肥处理比化肥处理略高;猪厩肥处理略低.4 种处理的单位产量的 GWP 较化肥处理分别增减了 154 %,136 %,17 %和 10 %.

表 2　有机肥施用对 CH_4 和 N_2O 综合温室效应的影响

Table 2　Effect of organic manure incorporation on the integrated GWP of CH_4 and N_2O

处理	20 years		500 years		单位产量的 GWP(20 年)2)
	GWP	ΔGWP1)/ %	GWP	ΔGWP/ %	
化肥	4207		1287		531
菜饼	10704	151	2201	71	1352
秸秆	9931	136	1790	39	1391
牛厩肥	4913	17	1195	- 7	651
猪厩肥	3773	- 10	1090	- 15	453

1) GWP 指同一时间尺度有机肥料与化肥处理比较 GWP 增减的百分数.2) 单位产量的 GWP 是指某一处理的 CH_4 和 N_2O 的综合 GWP 与经济产量的比值.

3　结论

(1) 有机肥施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的季节变化趋势无明显影响,但影响其排放量.与化肥处理相比,菜饼处理的 CH_4 和 N_2O 季节排放总量最高,猪厩肥处理最低,秸秆处理和牛厩肥处理增加 CH_4 排放量但减少 N_2O 排放量.

(2) CH_4 和 N_2O 排放综合温室效应分析结果表明,菜饼和秸秆处理的 GWP 明显地高于化肥处理,牛厩肥处理略高,猪厩肥处理可降低综合 GWP.单位产量的 GWP 以秸秆处理最高,菜饼次之,牛厩肥比化肥处理略高,猪厩肥处理最低.

(3) 从本生长季来看,施用猪厩肥对于实现环境效益与生产效益的协调发展具有一定作用.

参考文献:

1　IPCC. Climate Change. The supplementary report to the IPCC scientific assessment. New York: Cambridge University Press, 1992.

2　王明星.中国稻田甲烷排放.北京:科学出版社,2001.6~10.

3 FAO, IAEA. Measurement of methane and nitrous oxide emissions from agriculture. A Joint Undertaking by the Food and Agriculture Organization of the United Nations and the International Atomic Energy Agency. International Atomic Energy Agency, Vienna: 1992. 5 ~ 6.

4 Cicerone R J, Delwiche C C, Tyler S C et al. Methane emission from California rice paddies with varied treatments. Global Biogeochemical Cycles, 1992, **6**: 233 ~ 248.

5 Schuze H, Holzapafel P A et al. A 3-year continuous record on the influence of daytime, season, and fertilizer treatment on methane emission rates from an Italian rice field. Journal of Geophysical Research, 1989, **94**: 16405 ~ 16416.

6 Yagi K, Minami K. Effects of organic matter applications on emission from Japanese paddy fields. Soil Science and Plant Nutrition. 1990, **36**: 599 ~ 610.

7 Xing G X, Zhu Z L. Preliminary studies on N_2O emissions fluxes from upland soils and paddy soils in China. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1997, **49**: 17 ~ 22.

8 Zheng X H, Wang M X, Wang Y S et al. Characters of greenhouse gas (CH_4、N_2O、NO) emissions from croplands of southeast China. World Resource Review, 1999, **11**(2): 229 ~ 246.

9 陈苇, 卢婉芳, 段彬伍等. 猪粪与沼气渣对双季稻田甲烷排放的影响. 生态学报, 2001, **21**(2): 265 ~ 270.

10 Sass R L, Fisher F M, Turner F T, Jund M F. Methane emission from rice fields as influenced by solar radiation, temperature, and straw incorporation. Global Biogeochemical Cycles, 1991, **5**: 335 ~ 350.

11 邹建文, 焦燕, 王跃思, 黄耀. 稻田 CH_4、N_2O 和 CO_2 排放通量分析方法研究. 南京农业大学学报, 2002, **25**(4): 45 ~ 48.

12 黄耀, 蒋静艳, 宗良纲, 周权锁, Ronald L Sass, Frank M Fisher. 种植密度和降水对冬小麦田 N_2O 排放的影响. 环境科学, 2001, **22**(6): 20 ~ 23.

13 郑循华, 王明星, 王跃思等. 华东稻田 N_2O 和 CH_4 排放. 大气科学, 1997, **21**(2): 231 ~ 237.

14 胡霭堂. 植物营养学(下册). 北京: 北京农业大学出版社, 1995. 170 ~ 172.

15 Bremner J M, Blackmer A M. Terrestrial nitrification as a source of atmospheric nitrous oxide. In: Delwiche C. C. ed. Denitrification, nitrification and atmospheric N_2O. Chichester: John Wiley & Sons Ltd. 1981, 151 ~ 170.

16 Chadwick D R, Pain B F, Brookman S K. Nitrous Oxide and Methane Emissions Following Application of Animal Manures to Grassland. Journal of Environmental Quality, 2000, **29**: 277 ~ 287.

17 Angers A, Recous S. Decomposition of wheat and rye residue as affected by particle size. Plant Soil, 1997, **189**: 197 ~ 203.

18 Mosier A, Kroeze C, Nevison C et al. Closing the global atmospheric N_2O budget: Nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1998, **52**: 225 ~ 248.

19 Aulakh M S, Doran J W, Walters D T et al. Crop residue type and placement effects on denitrification and mineralization. Soil Science Society of American Journal, 1991, **55**: 1020 ~ 1025.