

고추와 콩 재배에서 토양온도, 토양수분과 무기태질소 변화에 따른 아산화질소 배출 평가

김건엽* · 소규호 · 정현철 · 심교문 · 이슬비 · 이덕배

농촌진흥청 국립농업과학원

Evaluation of N₂O Emissions with Changes of Soil Temperature, Soil Water Content and Mineral N in Red Pepper and Soybean Field

Gun-Yeob Kim*, Kyu-Ho So, Hyun-Cheol Jeong, Kyo-Moon Shim, Seul-Bi Lee, and Deog-Bae Lee

National Academy of Agricultural Science (NAAS), RDA, Suin-ro 150, Gwonseon-gu, Suwon-si 441-707, Korea

Importance of climate change and its impact on agriculture and environment has increased with a rise of greenhouse gases (GHGs) concentration in Earth's atmosphere. Nitrous oxide (N₂O) emission in upland fields were assessed in terms of emissions and their control at the experimental plots of National Academy of Agricultural Science (NAAS), Rural Development Administration (RDA) located in Suwon city. It was evaluated N₂O emissions at different soil water content, soil temperature, and mineral N conditions in a upland cultivating red pepper and soy bean. The results were as follows: 1) There were significant correlation between amount of N₂O emissions and soil temperature, soil water content and mineral N conditions showed 0.528^{**}, 0.790^{***} and 0.937^{***} in red pepper field and 0.658^{***}, 0.710^{***} and 0.865^{***} in soybean field, respectively. 2) From the contribution rate analysis as to contribution factors for N₂O emission, it appeared that contribution rate was in the order of mineral N (71.9%), soil moisture content (23.6%), and soil temperature (4.5%) in pepper field and mineral N (65.5%), soil moisture contents (19.2%), and soil temperature (15.2%) in soybean field.

Key words: N₂O emissions, Red pepper, Soybean, Soil water contents, Mineral N, Soil temperature

서 언

농업부문 온실가스 배출원 중 지구온난화잠재력이 CO₂ 대비 310배로 가장 큰 대기 중의 N₂O 농도는 산업혁명 이전 270 ppb에서 2006년에 320 ppb로 약 1.2배 증가하였다. 농업활동에서 N₂O의 주 배출원은 질소질 비료 및 가축분뇨이며, N₂O의 지구온난화 기여율은 5% 이상인 것으로 알려져 있다 (IPCC, 1996).

Iserman (1994)은 농경지 시용의 질소비료 절반은 무기태질소의 형태로 유실된다고 하였으며, 농경지로부터 대기로 배출되는 N₂O 중에서 81% 정도가 질소비료 시용에 의해 배출된다고 하였다. 질소비료 시용은 농경지로부터 대기로 배출되는 N₂O의 가장 큰 요인으로 작용하고 있다 (Minami, 1997). Hellebrand et al. (2008)은 토양의 무기태 질소 가운데 NO₃⁻-N의 상승이 N₂O 배

출을 증가시킨다고 하였다.

그러나 Firestone and Davidson (1989)은 토양에서 N₂O의 배출은 유기물이나 비료 시용을 줄이는 것보다 토양 중에서 발생하는 질산화 및 탈질 작용 등 생화학적 과정을 적절히 조절하는 것이 더 큰 효과를 볼 수 있다고 하였다. 그리고 그 다음 효과로는 Frolking et al. (1998)과 Parton et al. (1996)이 토양수분을 조절하여 N₂O 배출을 줄일 수 있으며, 대기온도에 따른 토양온도 변화에도 N₂O 배출에 영향을 받는다고 하였다.

호기조건의 건조 토양은 미생물에 의해 질산화작용이 촉진되고, 상대적으로 습한 토양에서는 탈질현상으로 N₂O와 N₂의 발생이 증가한다 (Davidson, 1991).

특히 영농현장에서 인위적으로 조절할 수 있는 토양 수분함량은 가스 확산과 같이 토양의 산화환원에 영향을 미치며, 유기탄소와 암모늄, 질산염과 같은 용해 양분들의 유효도에 영향을 미친다. Lemke et al. (1998) 및 Wagner-Riddle et al. (1997)은 토양 수분함량과 N₂O 배출량과의 관계에서 토양 공극률에 대한 용적수분

접수 : 2010. 11. 15 수리 : 2010. 12. 16

*연락처 : Phone: +82312900240

E-mail: gykim@korea.kr

함량 비율 (WFPS, water-filled-pore-space)이 70~90%에서 탈질이 가장 많이 일어나며, WFPS 90%이상에서는 N₂O 배출량이 급격히 감소한다고 하였다.

국내에서 지금까지의 농업부분 온실가스 연구는 주로 배출량 측정에 집중된 관계로 농업생태계에서 요인별로 온실가스배출에 정량적으로 연구된 검증 자료가 미미한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 밭에서 N₂O 배출에 영향을 주는 요인들의 특성을 파악하고, 이러한 요인들이 N₂O 배출에 얼마나 영향을 주는지를 정량적으로 밝히고 온실가스 관리에 필요한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

재료 및 방법

본 시험은 N₂O 배출에 영향을 주는 요인들의 특성을 파악하고 배출에 대해 미치는 영향을 정량적 해석을 위해 수원시에 위치한 국립농업과학원의 시험포장에서 수행하였다. 시험 토양은 고평통 식양토 (37°15'27.68"N, 126°59'16.05"E)에서 유기물 함량이 18.3 g kg⁻¹, 암모니아태질소가 83.1 mg kg⁻¹ 그리고 질산태질소가 83.9 mg kg⁻¹로서 토양의 이화학성 분석은 Table 1과 같으며, 무기태질소는 2 mol KCl방법으로 분석하였다.

고추 (마니파)를 2008년 2월 22일에 파종하고 5월 20일에 재식거리는 60 (이랑거리)×40 cm (포기거리)로 정식하였고, 콩 (대풍)은 5월27일에 파종하고 재식거리는 60×20 cm로 하였다. 고추와 콩의 각 시험구는 28 m², 3반복으로 하였다.

시비는 농촌진흥청 작물별 시비처방기준 (RDA, 1999)에 의한 표준시비방법으로 하였다. 고추에서 NPK (화학비료)+돈분퇴비구는 NPK처리의 N-P₂O₅-K₂O를 190-112-1 49 kg ha⁻¹과 돈분퇴비 15,000 kg ha⁻¹을 전량 기비 하였다. 콩의 NPK+돈분퇴비구는 N-P₂O₅-K₂O를 32-33-37 kg ha⁻¹과 고추와 같이 돈분퇴비 15,000 kg ha⁻¹을 전량 기비 하였다. NPK처리에서 N은 3회 분시, P₂O₅는 전량 기비, K₂O는 2회 분시 하였다.

작물 재배기간 중 토양수분함량은 tensiometer로 측정하였고, 토양온도 측정은 Hydraprobe (Stevens-water Co.)를 작물의 근권인 토양 깊이 20 cm에 설치하여 측정하였다. 토양의 무기태 질소는 콩을 대상으로 원소자동분석기 (Automatic analyzer; FIAstar 5000)로 2 mol

KCl 방법으로 NH₄⁺-N과 NO₃⁻-N을 분석하였다. 고추와 콩 등 2가지 작물의 N₂O 포집 방법은 비정체형, 밀폐형태인 순환형 상자법 (Denmead, 1979)을 이용하여 외부로의 공기 유출이 없도록 시험포장에서 포집하였고, N₂O 분석은 포집한 gas는 실험실에서 GC(Gas Chromatography)로 분석하였다. 설치된 chamber는 지름이 0.25 m, 높이가 0.5 m인 PVC 소재로 제작하였다. N₂O 배출량은 1주일에 2회 측정하였고 토양의 무기태질소 분석은 1주 1회 실시하였다.

채취한 공기 시료의 N₂O 기체농도는 10 port와 4 port valve를 장착한 GC-ECD (Varian 3800)를 사용하였고 column은 Porapack Q (80/100 mesh)를 충전한 1/8"×2 m의 stainless steel tubing column, 그리고 Detector의 온도는 320 °C로 하였다. N₂O 분석 조건은 Table 2와 같다.

플럭스는 다음 식에 따라서 계산하였다.

$$F (\text{mg m}^{-2} \text{ hr}^{-1}) = \rho \cdot V \cdot A^{-1} \cdot \Delta c \cdot \Delta t^{-1} \cdot 273 \text{ T}^{-1}$$

ρ는 가스밀도 (mg m⁻³),

A는 chamber 바닥면적 (m²),

V는 chamber 내 공기체적 (m³),

Δc/Δt는 chamber내 가스농도의 평균 증가속도 (10⁻⁶ m³ m⁻³ hr⁻¹),

T는 chamber 내 평균기온 (K)

Table 2. Gas Chromatographic analysis conditions for N₂O measurement.

Detector		ECD
Column	Packing material	Porapack Q (80/100)
	Materials	Stainless steel
	O.D. x length	1/8" x 2 m
Cargier gas	N ₂	
Flow rate	30 ml min ⁻¹ (Carrier + make up)	
Temperature	Column	70°C
	Injector	80°C
	Detector	320°C
Retention time	3.2 min	
Concentration of calibration gas	0.5 and 1.0 ppmv N ₂ O in N ₂	
Loop	2 ml	

Table 1. Chemical properties of soil before experiment.

Soil texture	pH (1:5 H ₂ O)	EC dS m ⁻¹	OM g kg ⁻¹	Av. P ₂ O ₅ mg kg ⁻¹	NH ₄ -N mg kg ⁻¹	NO ₃ -N mg kg ⁻¹	Exch. Cation		
							K	Ca	Mg
Clay loam	6.56	0.31	18.3	150	83.1	83.9	0.6	5.5	1.5

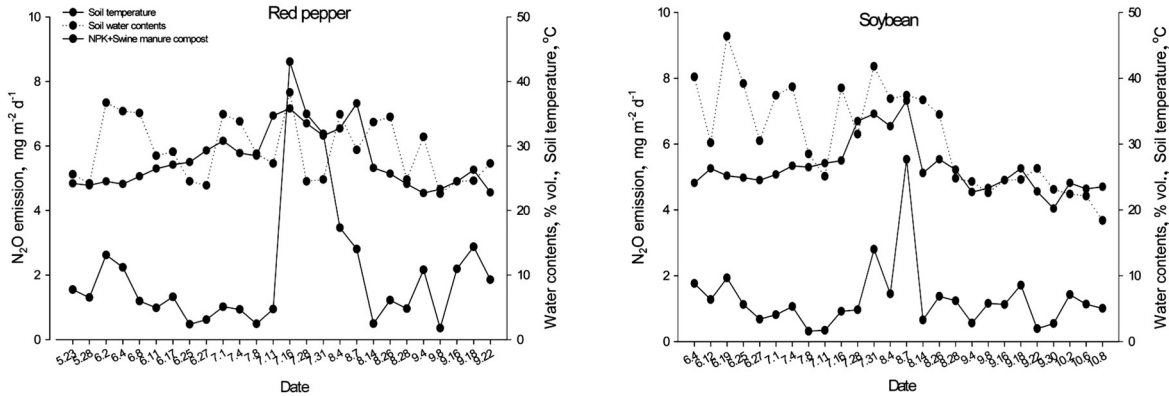


Fig. 1. Temporal changes of N₂O emissions as affected by different fertilizers in upland soils (all flux measurements included).

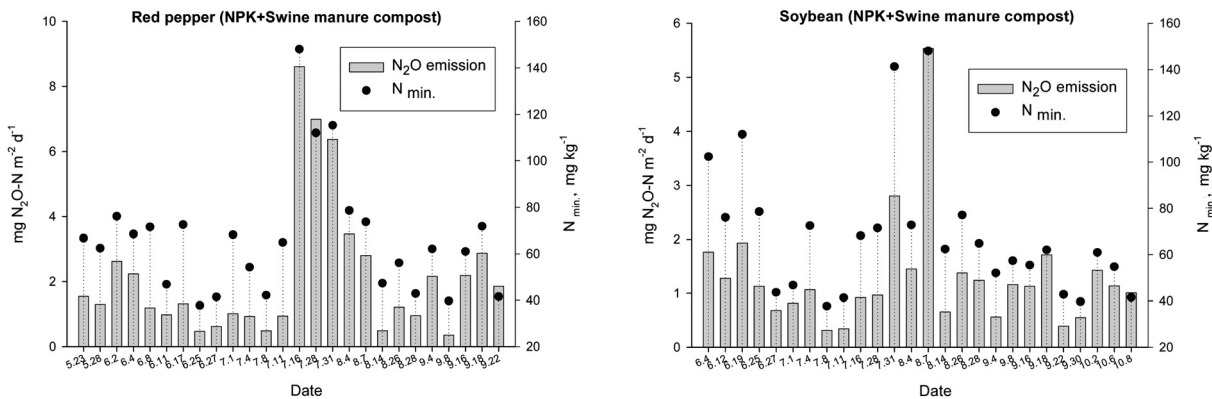


Fig. 2. Daily changes of N mineral and N₂O emission in red pepper and soybean field.

N₂O ρ값 (T=273 K)은 다음과 같다.

$$\rho_{N_2O} = 1.96, \rho_{N_2O-N} = 1.25$$

N₂O 배출에 대한 기여율은 무기태질소, 토양수분과 토양온도 등의 독립변수들의 표준편회귀계수로 구하였고, 상관분석은 SAS를 이용하여 분석하였다.

결과 및 고찰

토양수분, 토양온도 및 N₂O 배출량의 경시적 변화는 Fig. 1과 같다. 고추의 토양수분함량의 측정값 범위는 22.2~48.5%, 토양온도는 21.3~35.1°C, 콩에서 토양수분함량의 범위는 18.2~46.5%, 토양온도는 19.3~36.7°C로 나타났다. N₂O 배출량 추이는 전 재배기간 중 토양온도 변화에 따라 N₂O 배출 양상이 같은 흐름을 보이지 않았으나, 여름철인 7월 초에서부터 8월 중순까지 토양온도가 상승함에 따라 N₂O 배출이 상승하는 것으로 나타났다. 토양수분의 변화는 재배기간 동안 N₂O 배출 양상과 대체로 유사한 양상을 나타냈다. 이는 토양수분 (Stevens et al. 1997; Arnone and Bohlen 1998; Hou et al. 2000)과 토양온도 (Gödde and Conrad, 1999)의

변화에 따라 N₂O 배출량의 양상이 비슷하다는 결과와 일치하였다.

고추와 콩 밭에서 N₂O 배출량과 토양 중 무기태질소의 경시적 변화는 Fig. 2와 같다. 고추와 콩 밭 모두 N₂O 배출 양상은 토양 중 무기태질소량의 변화에 따라 비슷한 흐름을 보였고, 고추에서는 7월 중순에서 8월 초순에 토양 중 무기태질소량의 상승함에 따라 N₂O 배출이 크게 증가하였고, 콩은 7월 하순과 8월 상순에서 무기태질소량 상승에 따라 두 번의 큰 peak가 있었다.

Figure 1과 2에서 나타난 것과 같이 N₂O 배출 양상은 토양수분, 토양온도 그리고 토양 중 무기태질소의 변화와 밀접한 경향이 있었으며, N₂O 배출량과 관계가 밀접한 요인은 토양수분, 토양온도 그리고 토양의 무기태질소라고 하였으며 (Sozanska et al. 2002; Conen et al. 2000; Dobbie et al. 1999; Mahmood et al. 1998; Clayton et al. 1997), Mosier et al. (1998)은 일반적으로 토양에 무기태질소를 공급하면 N₂O 플럭스가 증가된다고 하였다.

Figure 3은 고추와 콩을 대상으로 N₂O 배출량과 토양수분, 토양온도 및 무기태질소를 회귀 분석하였다. N₂O 배출과 토양온도, 토양수분과 무기태질소와의 관계는 고

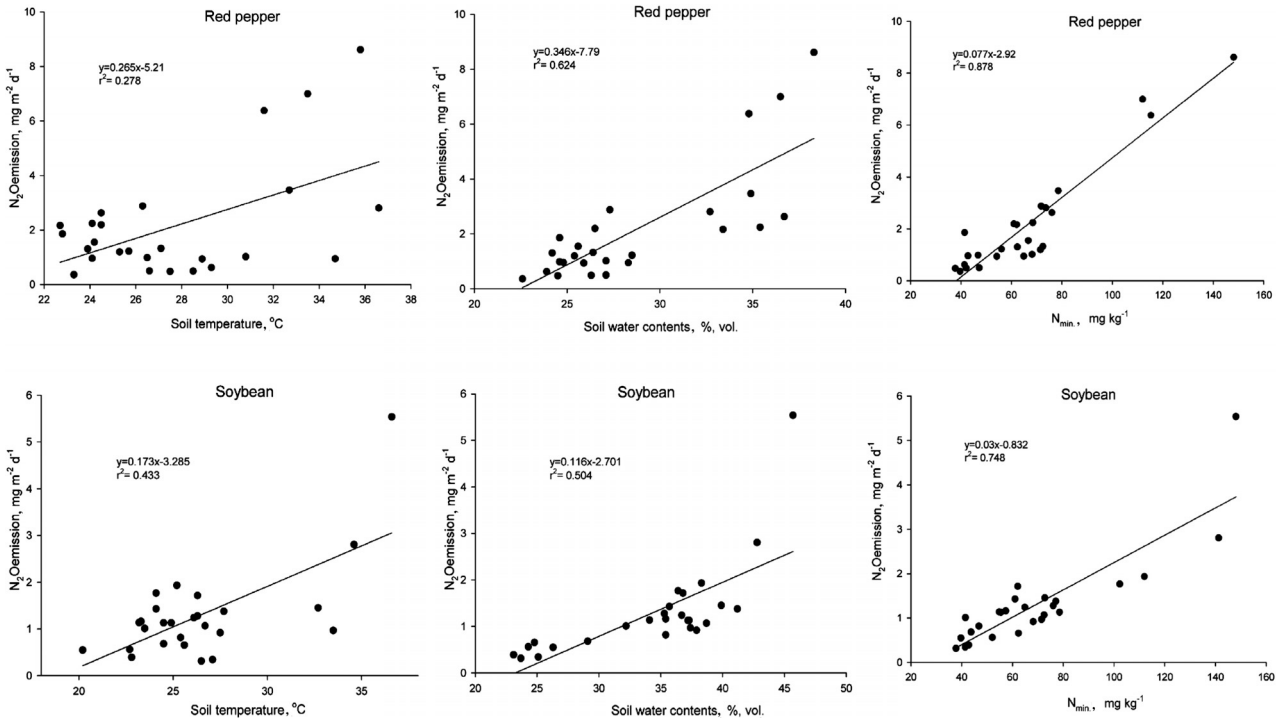


Fig. 3. Correlations between N₂O emissions and soil water contents, soil temperature, and mineral N content in red pepper and soybean field.

Table 3. Multiple regression analysis to contribution factors of N₂O in red pepper and soybean field.

Crop	Statistical analysis coefficient	Soil properties		
		Temperature (a)	Water contents (b)	N _{min.} (c)
Red pepper	Standardized (β)	-0.021	0.150	0.832
	Pearson correlation (r)	0.528**	0.790***	0.937***
	Contribution (%)	4.5	23.6	71.9
	Multiple regression eq.	$y = -3.944 - 0.011a + 0.066b + 0.068c$		
Soy bean	Standardized (β)	0.104	0.144	0.689
	Pearson correlation (r)	0.658***	0.710***	0.865***
	Contribution (%)	15.2	19.2	65.5
	Multiple regression eq.	$y = -1.934 + 0.028a + 0.024b + 0.025c$		

** p<.01, *** p<.001

추에서 각각 27.8%, 62.4% 및 87.8%, 콩은 43.3%, 50.4% 및 74.8%를 설명할 수 있었다.

N₂O 배출량과 토양온도, 토양수분함량 및 무기태질소의 상관 분석한 결과 (Table 3), 고추에서 0.528**, 0.790*** 그리고 0.937***, 콩은 0.658***, 0.710*** 그리고 0.865***으로 고도로 유의하여 N₂O 배출량은 토양온도, 토양수분 그리고 무기태질소가 가장 큰 배출에 영향을 주는 것으로 나타났다. Arone and Bohlen (1998)은 N₂O 배출량과 토양 수분함량과는 정의 상관관계가 있다고 하였으며, Dobbie et al. (1999)은 남부 스코틀랜드의 N₂O 배출량이 조사지역과 기후 차이에 관계없이 토양수분과

밀접한 관계가 있다고 하였다. Sozanska et al. (2002)은 토양수분에서 액상과 기상부분을 고려한 WFPS (Water Filled Pore Space)가 80~85%에서 N₂O 배출이 최대가 되고, 토양 수분, 토양온도와 질소소비량이 증가함에 따라 배출도 증가한다고 하였다. Hellebrand et al. (2008)은 유채와 호밀 등 일년생작물에서 N₂O 배출량과 토양 중 NO₃⁻-N은 정의 상관관계가 있으며, NO₃⁻-N이 높으면 N₂O 배출량도 많다고 하였다. Zhang et al. (2008)은 토양의 N₂O 배출 플럭스와 토양 중 NH₄⁺-N 그리고 NO₃⁻-N은 유의한 상관을 가진다고 하였다. Clayton et al. (1997)은 영년생 라이그라스 재배 토양에서 N₂O 배

출은 토양수분, 토양온도, 질소 시비량 그리고 무기태질소량과는 높은 상관관계가 있다고 하였다. 이와 같이 인위적으로 조절이 불가능한 토양온도를 제외하고 밭 토양에서 온실가스를 감축하기 위해서는 N_2O 배출에 큰 영향을 주는 토양수분과 무기태질소와 관계가 있는 질소시비량을 조절함으로써 가능하다고 생각된다.

N_2O 배출에 영향을 주는 토양수분, 토양온도 그리고 무기태질소 등 3가지 요인 중 N_2O 배출에 얼마나 영향을 주는지를 정량적으로 밝히기 위해 N_2O 배출에 대한 기여도를 분석한 결과 (Table 3), N_2O 배출에 영향을 미치는 요인은 고추에서는 무기태질소 (71.9%), 토양수분 (23.6%), 토양온도 (4.5%), 그리고 콩은 무기태질소 (65.5%), 토양수분 (19.2%), 토양온도 (15.2%) 순으로 나타났다.

요 약

밭에서 N_2O 배출에 영향을 주는 요인들의 특성을 파악하고, 이러한 요인들이 N_2O 배출에 얼마나 영향을 주는지를 정량적으로 밝히고자, 수원시에 위치한 국립농업과학원 기후변화생태과 시험포장에서 N_2O 배출 시험을 수행하였다. 고추와 콩에서 NPK+돈분퇴비를 처리하여 N_2O 배출에 미치는 요인들과 배출에 미치는 영향을 조사한 결과는 다음과 같다.

- (1) N_2O 배출량과 토양온도, 토양수분함량 및 무기태질소의 상관 분석한 결과, 고추에서 0.528^{**}, 0.790^{***} 그리고 0.937^{***}, 콩은 0.658^{***}, 0.710^{***} 그리고 0.865^{***}으로 고도로 유의하여 N_2O 배출량에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.
- (2) N_2O 배출에 영향을 미치는 요인은 고추에서는 무기태질소 (71.9%), 토양수분 (23.6%), 토양온도 (4.5%), 그리고 콩은 무기태질소 (65.5%), 토양수분 (19.2%), 토양온도 (15.2%) 순으로 나타났다.

인 용 문 헌

Arone, J.A. and P.J. Bohlen. 1998. Stimulated N_2O flux from intact grassland monoliths after two growing seasons under elevated atmospheric CO_2 . *Oecologia*. 116:331-335.

Clayton, H., I.P. Mctagart, J. Parker, L. Swan, and K.A. Smith. 1997. Nitrous oxide emissions from fertilised grassland : A 2-year study of the effects of N fertiliser form and environmental conditions. *Biol. Fertil. Soils* 25:252-260.

Conen, F., K.E. Dobbie, and K.A. Smith. 2000. Predicting

N_2O emissions from agricultural land through related soil parameters. *Global Change Biology*. 6:417-426.

Davidson, E.A. 1991. Fluxes of nitrous oxide and nitric oxide from terrestrial ecosystems. In: *Microbial Production and Consumption of Greenhouse Gases: Methane, Nitrous Oxide and Halomethanes* (eds Rogers JE, Whitman WB), American Soc. of Microbiol., Washington, D.C. 219-235.

Denmead, O.T. 1979. Chamber systems for measuring nitrous oxide emission from soils in the field. *Soil Sci. Soc. of America J.* 43:89-95.

Dobbie, K.E., I.P. Mctagart, and K.A. Smith. 1999. Nitrous oxide emissions from intensive agricultural systems: variations between crop and seasons; key driving variables; and mean emission factors. *J. Geophys. Res.* 104:26891-26899.

Firestone, M.K. and E.A. Davidson. 1989. Microbiological basis of NO and N_2O production and consumption in soil. In: *Andreae, M.O., Schimel, D.S. (Eds.), Exchange of Trace Gases between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere*. Wiley, New York.

Frolking, S.E., A.R. Mosier, and D.S. Ojima. 1998. Comparison of N_2O emissions from soils at three temperate agricultural sites: simulations of year-round measurements by four models. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 52:77-105.

Gödde, M. and R. Conrad. 1999. Immediate and adaptational temperature effects on nitric oxide production and nitrous oxide release from nitrification and denitrification in two soils. *Biol. Fertil. Soils*. 30:33-40.

Hellebrand, H.J., V. Scholz, and J. Kern. 2008. Fertilizer induced nitrous oxide emissions during energy crop cultivation on loamy sand soils. *Atmospheric Environment* 42:8403-8411.

Hou, A., H. Akiyama, Y. Nakajima, S. Sudo, and H. Tsuruta. 2000. Effects of urea form and soil moisture on N_2O and NO emissions from Japanese Andosols. *Chemosphere - Global Change Science*. 2:321-327.

IPCC. 1996. Revised IPCC guideline for national greenhouse gas inventories: Reference Manual, revised in 1996, IPCC.

Iserman, K. 1994. Agriculture's share in the emissions of trace gases affecting the climate and some cause oriented proposals for reducing this share. *Environ. Pollut.* 83, 95-111.

Lemke, R.L., R.C. Izaurralde, S.S. Malhi, M.A. Arshad, and M. Nyborg. 1998. Nitrous oxide emissions from agricultural soils of the Boreal and Parkland regions of Alberta. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:1096-1102.

Mahmood, T., R. Ali., K.A. Malik, and S.R.A. Shamsi. 1998. Nitrous oxide emissions from an irrigated sandy-clay loam cropped to maize and wheat. *Biol. Fertil. Soils*. 27:189-196.

Minami, K. 1997. Mitigation of nitrous oxide emissions

- from fertilized soils. In: Proceedings of IGAC Symposium, Nagoya, Japan.
- Mosier, A.R., W.J. Parton, and S. Phongpan. 1998. Long-term large N and immediate small N additions effects on trace gas fluxes in the Colorado shortgrass steppe. *Biol. Fertil. Soils*. 28:44-50.
- Parton, W.J., A.R. Mosier, D.S. Ojima, D.W. Valentine, D.S. Schimel, K. Weier, and A.E. Kulmala. 1996. Generalized model for N₂ and N₂O production from nitrification and denitrification. *Global Biochem. Cycles*. 10:401-412.
- RDA. 1999. Fertilizer recommendation for crops. Rural development administration, Suwon, Korea.
- Sozanska, M., U. Skiba, and S. Metcalfe. 2002. Developing an inventory of N₂O emissions from British Soils. *Atmos. Environ.* 36:987-998.
- Stevens, R.J., R.J. Laughlin, L.C. Burns, J.R.M. Arah, and R.C. Hood. 1997. Measuring the contributions of nitrification and denitrification to the flux of nitrous oxide from soil. *Soil. Biol. Biochem.* 29:139-151.
- Wagner-Riddle, C., G.W. Thurtell, G.E. Kidd, E.G. Beauchamp, and R. Sweetman. 1997. Estimates of nitrous oxide emissions from agricultural fields over 28 months. *Can. J. Soil Sci.* 77:135-144.
- Zhang, H.H., P.J. He, L.M. Shao, and L. Yuan. 2008. Minimisation of N₂O emissions from a plant-soil system under landfill leachate irrigation. *J. Waste Management*. 6:1-6.