

塋土土壤剖面中 N₂O 浓度的时间和空间变异

梁东丽¹, 同延安¹, Ove Emteryd², 李生秀¹, 方日尧¹, 张树兰¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 瑞典农业大学森林生态系, 瑞典 宇默奥 90183)

摘要:用土壤探头法对 土玉米-小麦轮作体系下不同剖面层次 N₂O 浓度变化进行了 2a 的田间原位监测。结果表明: 土土壤剖面中 N₂O 浓度具有较大的时间变异, 表现为土壤 N₂O 浓度在一年的不同时期变化较大, 以温度高、水分充足的 7~8 月份为最高, 温度较低的冬季最低; 全年中土壤剖面中各层 N₂O 浓度在降水或者灌溉后均有一个峰值。从空间上来看, 土壤不同剖面层次的 N₂O 浓度的变化以 60cm 土层最高, 表层 10cm 最低, 浓度在剖面中的变化顺序为 10cm<30cm<150cm<90cm<60cm。2a 的研究结果相比, 降水量较高的 1999 年土壤剖面各层的 N₂O 浓度较高。2a 试验期间对照和施肥处理各土壤层次的变异系数分别为 7.1%~29.4%和 10.8%~50.9%, 其中 1999 年变异系数分别为 20.2%~29.4%和 32.11%~50.9%, 2000 年分别为 7.14%~18.4%和 10.8%~25.9%。从变异系数上来看, 1999 年高于 2000 年; 施肥处理高于对照; N₂O 浓度较高的下层土壤高于 10cm 表层土壤。两个处理 N₂O 出现的时间和剖面变化趋势相同, 但施肥处理各时期、各土层的浓度均高于对照。这些结果充分说明 土土壤存在明显的反硝化 N₂O 气态损失, 施肥显著地增加了其产生量, 深层土壤 N₂O 的产生是 土 N₂O 的一个不容忽视的来源; N₂O 的产生和排放具有极大的时间和空间变异。

关键词: 土; 时间变异; 空间变异; 氧化亚氮

Spatial and temporal variation of nitrous oxide concentrations in soil profiles of Manural Loessial Soil

LIANG Dong-Li¹, TONG Yan-An¹, Ove Emteryd², LI Sheng-Xiu¹, FANG Ri-Yao¹, ZHANG Shu-Lan¹ (1. College of Resources and Environment, NWUAF, Shaanxi Yangling, 712100, China; 2. Department of Forestry Ecology, Sweden Agriculture University, Sweden, Umea, 90183). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (4): 731~737.

Abstract: Nitrous oxide (N₂O) is one of the important greenhouse gases. Although it contributes only 5% global warming potential, great attention has been given to it due to its depletion of ozone layer of stratosphere. It is estimated that soil contributes to 70% of anthropogenic N₂O sources. Nitrification and denitrification dominated by soil microorganisms are two main sources for emission of soil N₂O. Therefore, all soil physical, chemical and biological properties affecting microbial activities will influence N₂O concentration in the soil. The uneven distribution of the soil nitrogen, carbon and oxygen in the soil will definitely increase the temporal and spatial variation of its concentration. Study of the temporal and spatial

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(30230230); 西北农林科技大学科研专项资助项目

收稿日期:2002-03-25; **修订日期:**2002-09-20

作者简介:梁东丽(1963~), 女, 陕西省铜川市人, 博士, 副研究员, 主要从事氮素营养和损失研究。E-mail: liangdongli@nwsuaf.edu.cn

Foundation item: Key Project of National Natural Science Foundation(30230230), Siono-Sweden cooperation project and special research project of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and forestry

Received date:2002-03-25; **Accepted date:**2002-09-20

Biography: Liang Dongli, Doctor, Associate professor, Mainly engaged in the nitrogen nutriation and losses. E-mail: liangdongli@nwsuaf.edu.cn

N₂O concentration variations in different soil layers does not only help understand the N₂O sources, sinks and production mechanism, but also knows the significance on N losses.

A field experiment was carried out on the Manural Loessial soil for about two years to determine the spatial and temporal variations of N₂O concentrations in different soil layers using soil probes techniques. A great temporal variation was found during a year. The highest N₂O concentration took place in the July and August when both the temperature and soil moisture were high. Since then the N₂O concentration in soil profile decreased until reaching its lowest point in the winter. A N₂O peak appeared after irrigation or raining. For spatial variation, the highest N₂O concentration occurred in 60 cm soil layer while the lowest in 10 cm soil layer. N₂O concentrations in soil profiles decreased in the order: 60 cm>90cm>150cm>30cm>10cm soil layer. The two years' results were striking: N₂O concentrations in the soil profile were higher in 1999 than those in the 2000 due to difference in rainfall and irrigation amount. Coefficients of variation for the two years were 7.14%~29.4% for the control plot and 10.81%~50.9% for fertilized plot, respectively. Of these, the variations in 1999 were 20.2%~29.4% and 32.11%~50.9% for control treatment and fertilized treatment, while those were 10.8%~25.9% and 7.1%~18.4% in 2000, respectively. Obviously, the variations were higher in 1999 than in 2000; higher in the fertilized plot than control plot; and lower in the top soil than in the deep soil in soil profiles. Both the control and fertilized plot had the same temporal and spatial variations trends. However, the N₂O concentrations in each soil layer for each sampling were higher in fertilized plot than in the control plot. The experiment revealed that there existed N₂O emission in manural loessial soil from denitrification, which had large temporal and spatial variations, application nitrogen fertilizer had definitely increased nitrous oxide concentration in the soil profiles. In addition, N₂O production in deep soil layers was an important nitrous oxide sources for the tested soil.

Key words: manural loessial soil; temporal variation; spatial variation; nitrous oxide

文章编号:1000-0933(2003)04-0731-00 中图分类号:S154.4 文献标识码:A

反硝化作用不仅造成土壤氮素损失^[1、2]和降低肥料利用率^[3],而且是大气中人类活动所形成的 N₂O 的重要来源^[4],全球温室效应 N₂O 的贡献率为 5%^[5],并且参与破坏臭氧层^[6]。近 20~30a 来由于化学氮肥施用量的急剧增加^[7],大气中 N₂O 正以每年 0.25% 的速度上升^[8]。N₂O 的温室效应因子又是 CO₂ 分子的 200 倍,生命周期 160a,因而对氮素循环和环境影响方面具有特别的重要意义。大约 70% N₂O 来源于土壤^[9],而土壤中 N₂O 主要来源于土壤微生物控制的硝化作用和反硝化作用,因而凡影响到土壤微生物活动的土壤物理、化学及生物学因子均影响 N₂O 的产生;土体本身碳、氮和氧气分布又极不均匀,这就使得土壤中 N₂O 的产生和排放存在着巨大的时间^[10]和空间变异^[11],长期以来一直是准确研究和预测 N₂O 年排放量的主要障碍。

明确土壤剖面各层 N₂O 浓度的时间和空间变异规律,不仅有助于更好地了解土壤 N₂O 库、源及其产生机理,并且对采取相应措施减少 N₂O 的逸出和 NO₃⁻淋溶具有重要的意义。尽管已有研究证明,亚表层土壤中含有大量反硝化微生物,存在明显的反硝化潜势^[12、13];6m 土体的反硝化潜势也随土壤中加入有效碳量的增加而上升^[14];亚表层土壤较低的反硝化量并非由于缺乏反硝化微生物而是作为能源物质的可溶性碳缺乏所致^[15、16],但由于研究方法所限,迄今国内外对有关亚表层土壤反硝化的原位测定的研究结果很少^[17]。本文就 1999~2000 年在国家黄土性肥力和肥料效益监测实验站进行的土 N₂O 排放时间、空间变异研究的结果予以报道。

1 材料与方法

1.1 试验地与数据

试验布置在陕西杨凌国家黄土肥力和肥料效益监测实验站,试验点海拔 524.7m;年均温度 13~15℃;

年降水量 550~700mm, 7~9 三个月的降水约占全年总降水的 50% 以上,夏初降水较少、雨季短促。年蒸发量 800~900 mm,属暖温带半湿润偏旱气候,成土母质为第四纪风积黄土,主要耕作土壤是褐土类、 土亚类。

试验地为匀地 3a 后的灌溉地。采用小麦、玉米轮作,一年两熟。按当地耕作、灌溉和施肥方式进行管理。试验地 0~200 cm 土体物理性粘粒高于 230 g · kg⁻¹。试验开始时 0~20 cm 土层土壤肥力状况为:土壤有机质 6.253 g · kg⁻¹,全氮 1.43 g · kg⁻¹,NO₃-N 3.97 mg · kg⁻¹,土壤孔隙度以 60~120 cm 土层最低,pH 8.24。试验开始时主要土壤物理化学性质见表 1。

表 1 供试土壤的物理化学性质

Table 1 Soil physical and chemical properties

土层深度 Soil depth (cm)	土壤孔隙度 Soil porosity (%)	土壤容重 Bulk density (g · cm ⁻³)	NO ₃ -N (mg · kg ⁻¹)	土壤颗粒(%) Particle sizes			土壤质地 Soil texture
				>0.02mm	0.02~0.002mm	<0.002mm	
0~20	>24	1.2	3.97	27.5	49.0	23.5	粉砂质粘壤土
20~40	>19	1.46	0.31	24.3	49.5	26.2	粉砂质粘土
40~60	>20	1.48	0.42	30.0	45.5	24.6	粉砂质粘壤土
60~80	<18	1.50	0.42	26.7	47.5	25.9	粉砂质粘土
80~100	<18	1.37	0.85	25.3	39.4	35.3	壤质粘土
100~120	<18	1.44	0.7	26.3	38.7	35.0	壤质粘土
120~140	>20	1.45	0.77	32.0	38.0	30.0	壤质粘土
140~160	>24	1.31	0.12	31.6	43.2	25.2	壤质粘土
160~180	>24	1.37	0.25	32.7	46.2	21.1	粉砂质粘壤土
180~200	>24	1.37	0.08	37.1	42.1	20.7	粘壤土

1.2 田间原位测定

目的在于了解 N₂O 的时间(季节性变化)和空间(剖面层次)变异。原位测定时同时对同一地点不同土层深度的的气体样品进行采集,避免因采样时间不同而造成测定结果无法比较。设不施氮(对照)和施氮肥 2 个处理,试验时间为 1999 年 3 月至 2000 年 12 月,每年包括小麦和玉米两个生长季。施肥者,于 1999 年小麦拔节期(3 月 6 日)施入 N 240 kg · hm⁻²;于 7 月 9 日玉米拔节期施入 N 180 kg · hm⁻²,P₂O 90 kg · hm⁻²,同年 10 月份第二料小麦播种前施入 N 240 kg · hm⁻²,P₂O₅ 90 kg · hm⁻²;2000 年玉米、小麦播种时施肥量与 1999 年完全相同,对照除不施氮肥外,其余均相同。氮源均用硝酸钾态氮,磷肥为过磷酸钙。除试验开始的 1999 年 3 月份外,均以基肥一次施入。试验面积为 322m² 大区,无重复。N₂O 的原位测定采用田间随机布点,重复 3 次。测定采用防水透气探头(Soil probe):为长 24 cm、内径 6 mm 和外径 8 mm 聚乙烯塑料管,外裹一层防水透气的 PTFE 薄膜。试验布置前挖好长 2 m、宽 1.1 m 和深 1.7 m 土壤剖面,根据 土土壤的剖面特点,分别在 10,30,60,90 和 150 cm 等 5 个深度(在作物行间)安装探头。方法是:首先用电钻打一个小于土壤探头直径的小洞,用力完全插入探头,再用土固定之。每个探头末端连接外径 0.4 mm 的硅胶管,后者沿剖面引至地表,末端连接一个两通气阀,用于采集气体样品;该气阀通常关闭,只在采集气体时打开。挖出的土壤按原土层回填。每 2 周或 1 月(2000 年)后用 2 ml 的气密性注射器(CODAN APS)抽取气体样品,降水或灌溉后加抽气体样品。

1.3 气体样的采集和分析

气体样品用 2ml 注射器抽取,用丁基橡胶堵住针眼及时分析,或注入到真空集气瓶中贮存以后分析。气体分析用美国 Varian 产 GC3800 气相色谱,检测器为含⁶³Ni的电子捕获器(ECD),柱子为 Porapak R80/100,并为 N₂O 测定专门配置一个气阀(以阻断 2 min 前和 2.8 min 后的气体进入检测器)。检测器、柱子和进样口的温度分别为 350℃、80℃和 120℃;载气为高纯氮,气流速度为 10 ml · min⁻¹。标准气为北京产 9.6 ml · 万方数据 99.999 %的高纯氮气稀释而形成一系列浓度的标准曲线;另外用瑞典产浓度为 328.2 nl · L⁻¹的标准气体进行校正。气相色谱测定 N₂O 的变异系数小于 5%。

2 结果与讨论

2.1 N₂O 气体浓度在土壤剖面中的变异

试验共设 5 个剖面层次。以每个土层作处理,每一次的测定值作为重复,试验期间各土层 N₂O 浓度所
作的统计分析结果见表 2。

表 2 黄土性土壤 N₂O 浓度的空间变异

Table 2 The spatial variation of N₂O on the loess soil (1999~2000)

土层深度 Soil depth (cm)	1999 年 (n=23)				2000 年 (n=14)			
	对照 Control plot		施肥 Fertilized		对照 Control plot		施肥 Fertilized	
	Concen. (nl·L ⁻¹)	C. V. (%)	Concen. (nl·L ⁻¹)	C. V. (%)	Concen. (nl·L ⁻¹)	C. V. (%)	Concen. (nl·L ⁻¹)	C. V. (%)
10	439.6 (d)	22.52	506.1 (d)	32.11	398.9	15.56	474.3	17.29
30	504.9 (c)	20.26	724.6 (c)	45.81	451.8	18.43	600.9	14.83
60	649.6 (a)	23.86	1094.6 (a)	50.90	558.9	7.14	910.0	25.89
90	603 (ab)	29.40	947.4 (ab)	45.72	529.3	12.01	777.7	18.09
150	595.5 (b)	24.04	911.1 (b)	32.15	496.3	16.07	654.4	10.81

括号内表示 $P<0.05$, LSD 检验结果

1999 年度土壤各层 N₂O 浓度较高,方差分析达极显著水平, LSD 检验的结果各个处理间差异显著;
2000 年土壤 N₂O 浓度普遍较低,尽管各土层平均值间差异较大,但是方差分析检验不显著。从平均值来
看,两年结果一致。无论是施肥还是对照处理,10 cm 和 30 cm 土层 N₂O 浓度最低;60 cm 和 90 cm 土层最
高。两个处理的 N₂O 浓度在土壤剖面中变化顺序均为 10cm<30cm<150cm<90cm<60cm。这种分布主要
源于不同土层的环境条件。反硝化过程是缺氧条件下的微生物活动,氧气供应多少直接影响着这一过程
的强弱。表层土壤疏松,利于通气;根系对水分的吸收和土表水分的蒸发,又降低了表层土壤的含水量,增
大了充气空间和氧气含量,这两方面都不利于反硝化作用进行。疏松的表层也利于气体交换,产生的 N₂O 气
体易于向大气扩散,更进一步降低了它的浓度。与此相反,60~120 cm 为粘化层,粘粒显著高于其它土层,
孔隙度最低(<18%),有着通气不良的自然基础;下渗的水分容易在这层蓄积,进一步强化了它的缺氧环
境;黄土母质的底层又累积有较多的有机物质,也为反硝化活动提供了较为充分的能源;质地粘重的土壤
产生的 N₂O 气体也不容易向外扩散;这些均有利于反硝化过程的进行。

从测定期间土壤各层 N₂O 浓度变异来看,同一时期同一土层施肥处理的变异系数均高于对照处理;同
一时期不同土层间以 10cm 表层土壤 N₂O 变异系数最小,下层土壤 N₂O 的变异系数相对较高;各层土壤最
高的变异系数来源于灌溉后的测定值。两年的结果相比,1999 年各层的测定变异系数均高于 2000 年。

2.2 N₂O 气体浓度的时间变异

图 1 是试验期间不施肥处理和施肥处理土壤 N₂O 浓度的变化情况(图中数据为 3 个重复的平均值),
图 2 是同时期降水和气温变化情况。

图 1a 和图 1b 相比,整个试验过程中对照处理 N₂O 浓度变化很小,1999 年和 2000 年浓度变化分别在
320~996 nl·L⁻¹和 312~648 nl·L⁻¹之间;而施肥处理 N₂O 浓度的变化较大,1999 年为 313~2467 nl·
L⁻¹,2000 年为 332~1309 nl·L⁻¹,施肥处理的 N₂O 浓度的最低值与对照接近,而最高值 1999 年(2467.3
nl·L⁻¹)是对照的 2.5 倍;2000 年(1309 nl·L⁻¹)是对照处理的 2 倍。因为施入的氮肥为硝态氮肥,如果将
对照处理的 N₂O 产生量视为土壤 N₂O 本底值,施肥处理土壤剖面中 N₂O 的增加值代表了施肥诱导的土壤
反硝化增加的 N₂O 的量。由测定结果可见: 土土壤上存在明显的反硝化 N₂O 气态损失,施肥显著的增加了
土壤中 N₂O 浓度的产生量。

如果把图 1 与图 2 结合起来,就不难看出 N₂O 浓度的时间变异是以空气温度和降水量均较高的 6~9
月份最高,其余月份较低。较高的土壤水分含量有利于土壤微生物活动,易于消耗氧气,造成厌氧条件;较
高的温度提高土壤微生物的活性,再加上作物生长根系分泌物的增加,为土壤反硝化的产生提供了条件,
因此土壤温度和水分是土壤 N₂O 产生的主要控制者^[18]。1999 年和 2000 年的结果形成了鲜明对比;

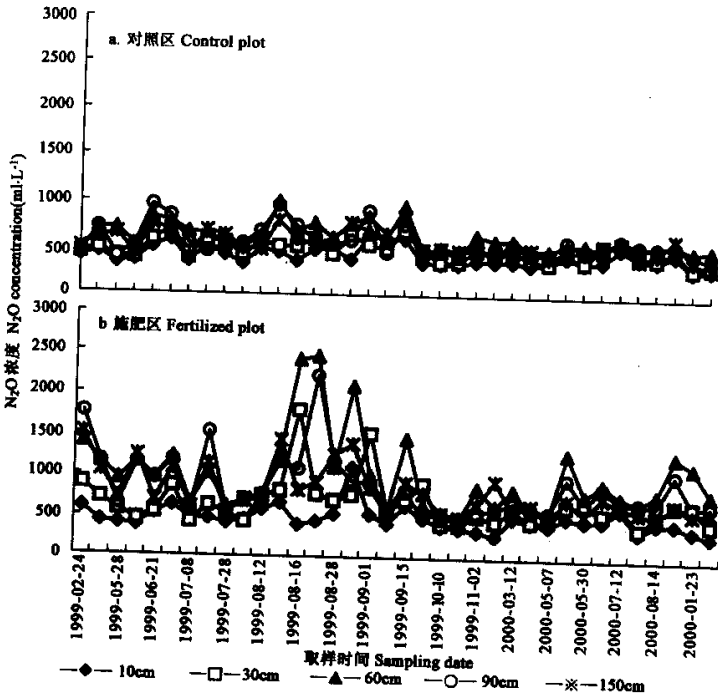


图 1 黄土性土壤土壤剖面中 N₂O 浓度的变化

Fig. 1 Temporal variation of N₂O concentration in soil profile of the manural loessial soil

2000 年两个处理剖面 N₂O 浓度均显著低于 1999 年;对照和施肥处理剖面中 N₂O 的最高浓度分别比 1999 年下降了 34.9%和 46.9%。这是因为 1999 年的年降水量为 638 mm,试验期间灌溉两次(8 月 10 日和 8 月 20 日),灌水量高达 180 mm,灌水后出现了 N₂O 的高峰值;2000 年年降水量仅 380 mm,比本地区年平均降水量低 170~220 mm,再加上没有灌溉,因而水分成为 N₂O 形成的限制因子。尽管 2a 试验期间施肥处理剖面各层 N₂O 浓度均高于对照处理,但两者的变化趋势相同,即降水和灌溉后常常伴随较高的 N₂O 峰值,进一步说明了水分对决定 N₂O 生成量的重要性^[19]。要正确估算土壤 N₂O 的产生量,就要对土壤剖面不同土层 N₂O 浓度和表面 N₂O 排放通量进行常年连续的监测。

3 讨论

土 N₂O 产生具有较大的时间变异,表现为 N₂O 浓度在一年不同时期变化较大,以气温高、水分充足的 7~8 月份为最高,温度较低的冬季最低,全年中土壤剖面中 N₂O 浓度在降水或者灌溉后有一个峰值。这与农业土壤中较高的 N₂O 排放量发生在早春和夏季,在作物生长后期或者秋季显著下降的报道一致^[10],而与 Groffman 和 Tiedje^[20]发现 Michigan 森林土壤早春和晚秋时 N₂O 排放量最高,在整个夏季 N₂O 的通量可以小到忽略不计以及 Nybory^[21]报道一年中最高 N₂O 排放量发生在春天土壤冻融交替时的结论不一致。从空间变异上来看,以 60cm 土层最高,表层 10cm 最低,浓度在剖面中的变化顺序为 10cm<30cm<150cm<90cm<60cm,充分说明亚表层土壤是 N₂O 的重要来源之一。

试验期间对埋设土壤探头各对应土层土壤的 NO₃ 和水分含量每月进行一次测定,但未发现土壤 NO₃⁻、水分或者土壤温度与同时期土壤 N₂O 浓度间有显著相关。N₂O 的产生和排放受到许多因子影响,具有高度空间变异数据土壤中各种影响因子总和只占其总变异的 30%左右^[23],其它变异则来源于土壤各种影响因子的相互作用以及由此而引起土壤剖面中物理、化学及生物学性质的变化。影响 N₂O 产生的环境

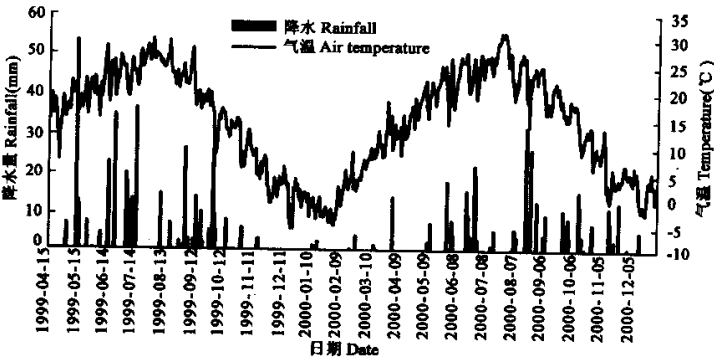


图 2 试验期间降水量和气温的变化

Fig. 2 Rainfall and temperature changes during experimental period

和农业措施的诸多因子中^[24],土壤水分和矿质氮浓度对土壤硝化作用和反硝化作用起着主导作用^[25],作物生长对土壤水分和矿质氮含量的消耗导致未施肥区土壤硝化作用和反硝化作用下降,从而使其 N₂O 浓度显著低于施肥处理。N₂O 的排放量是周围土壤中 N₂O 累积和再分配的结果,其累积表明了 N₂O 的产生速度超过了消耗和再分配的速度,深层土壤气体扩散到表面的速度小于其产生的速度因而产生积累;而再分配速度高于气体产生的速度时则没有积累。测得的 N₂O 排放量是土壤 N₂O 产生、消耗、扩散以及溶解在土壤溶液中的综合表现,受到土壤中许多因子影响,这就是不同的测定点变异大的原因。要准确测定土壤 N₂O 排放量,在设立采样计划时,必须充分考虑到其时间和空间的高度变异性。

References:

[1] Liang B C, MacKenzie A F. Seasonal denitrification rates under corn in two Quebec soils. *Can. J Soil Sci.*, 1997, **77**: 21~25.

[2] Simek M, Cooper J E, Picek T, *et al.* Denitrification in arable soils in relation to their physico-chemical properties and fertilization practice. *Soil Biol. Biolchem.*, 2000, **32**: 101~110.

[3] Estavillo M, Rodriguez M, Domingo M, *et al.* Denitrification losses from natural grassland in the Basque Country under organic and inorganic fertilization. *Plant Soil*, 1994, **162**: 19~29.

[4] Mahmood T, Malik K A, Shamsi S R A, *et al.* Denitrification and total N losses from an irrigated sandy-calve loam under maize-wheat cropping system. *Plant Soil*, 1998, **199**: 239~250.

[5] Mosier A R. Soil processes and global change. *Biol. Fertil. of Soils*, 1998, **27**: 221~229.

[6] Chang C, Cho C M, Janzen H H. Nitrous oxide emission from long-term manured soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1998, **62**: 677~682.

[7] Mahmood T, Ali R, Sajjad M I, *et al.* Denitrification and total fertilizer-N losses from an irrigated cotton field. *Biol. Fertil. Soil*, 2000, **31**: 270~278.

[8] Kaiser E A, Kohrs K, Kucke M, *et al.* Nitrous oxide release from arable soil: importance of N-fertilization, crops and temporal variation. *Soil Biol. Biolchem.*, 1998, **30**:1553~1563.

[9] Bouwman A F. Exchange of greenhouse gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere. In: Bouwman A F, ed. *Soils and the greenhouse effect*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 1990. 61~128.

[10] van Kessel C, Pennick D J, Farrell R E. Seasonal variation in denitrification and nitrous oxide evolution at the landscape scale. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, **57**: 988~995.

[11] Matson P A, Volkman C, Coppinger K, *et al.* Annual nitrous oxide flux and soil nitrogen characteristics in sagebrush and grassland ecosystems. *Biogeochemistry*, 1991, **14**: 1~12.

[12] Parkin T M, Meisinger J J. Denitrification below the crop rooting zone as influenced by surface tillage. *J.*

Environ. Qual., 1989, **18**: 12~16.

- [13] Yeomans J C, Bremner J M, McCarty G W. Denitrification capacity and denitrification potential of subsurface soils. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 1992, **23**: 919~927.
- [14] Jarvis S C, Hatch D J. Potential for denitrification at depth below long-term grass swards. *Soil Biol. Biochem.*, 1994, **26**: 1629~1636.
- [15] McCarty G W, Bremner J M. Availability of organic carbon for denitrification of nitrate in subsoils. *Biol. Fertil. of Soils*, 1992, **14**: 219~222.
- [16] McCarty G W, Bremner J M. Factors affecting the availability of organic carbon for denitrification of nitrate in subsoils. *Biol. Fertil. of Soils*, 1993, **15**: 132~136.
- [17] Weier K L, MacRae J M, Myers R J K. Denitrification in a clay soil under pasture and annual crop: losses from ^{15}N -labelled nitrate in the subsoil in the field using C_2H_2 inhibition. *Soil Biol. Biochem.*, 1993, **25**: 999~1004.
- [18] Maag M, Vinther F P. Effect of temperature and water on gaseous emission from soils treated with animal slurry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1999, **63**: 858~865.
- [19] Granli T, Bockman O C. Nitrous oxide from agriculture. *Norw. Jour. of Agri. Sci.*, 1994, **12**: 120~128.
- [20] Groffman P M, Tiedje J M. Denitrification in north temperate forest soils: Spatial and temporal patterns at the landscape and seasonal scales. *Soil Biol. Biochem.*, 1989, **21**: 613~620.
- [21] Nyborg M, Laidlaw J W, Solberg E D, *et al.* Denitrification and nitrous oxide emissions from a black Chernozemic soil during spring thaw in Alberta. *Can. J. Soil Sci.*, 1997, **77**: 153~160.
- [22] Ambus P, Christensen S. Spatial and seasonal nitrous oxide and methane fluxes in Danish forest-, grassland-, and agroecosystems. *J. Environ. Qual.*, 1995, **24**: 993~1001.
- [23] Flessa H, Dorsch P, Beese F. Seasonal variation of N_2O and CH_4 fluxes in differently managed soils in southern Germany. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**: 23115~23124.
- [24] Eichner M J. Nitrous oxide emissions from fertilized soils: summary of available data. *J. Environ. Qual.*, 1990, **19**: 272~280.
- [25] Fireston M K, Davidson E A. Microbiological based of NO and N_2O production and consumption in soil. In: Andreae M O and Schime D S, ed. *Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere*. New York: John Wiley & Sons, 1989. 7~21.