

黄土性土壤剖面不同层次 N_2O 浓度的原位监测

梁东丽^{1,*}, 吴庆强², 李生秀¹, 方日尧¹, Ove Emteryd³, Tord Magnusson³

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学资园艺学院, 陕西, 杨凌 712100

3. 瑞典农业大学森林生态系, 瑞典, 乌默奥 90183)

摘要:用土壤探头法对黄土性土壤玉米-小麦轮作体系下不同剖面层次 N_2O 浓度变化进行了 3a 的田间原位监测。结果证实了黄土性土壤深层反硝化作用的存在, 且 N_2O 浓度有着明显的时间和空间变异。表现为 N_2O 浓度受土壤气候条件(温度和降水)和生产管理措施的影响, 丰水年明显高于亏水年; 在降水或灌溉后出现瞬时 N_2O 浓度峰。由于小麦和玉米生长特点和作物生长季气候特点的差异, 玉米生长季土壤剖面各层 N_2O 浓度显著高于小麦生长期土壤剖面各层的浓度。统计分析结果表明: 土壤剖面中不同土层 N_2O 浓度的变化对照处理为 $60\text{cm} \approx 90\text{cm} \approx 150\text{cm} > 30\text{cm} > 10\text{cm}$, 而施肥处理为 $60\text{cm} > 90\text{cm} \approx 150\text{cm} > 30\text{cm} > 10\text{cm}$ 。深层土壤 N_2O 的主要来源是土壤的反硝化作用, 施肥显著地增加各土壤层次 N_2O 的产生量。

关键词:黄土性土壤; N_2O 排放; 土壤剖面; 反硝化作用

文章编号: 1000-0933(2009)03-1421-07 中图分类号: S154.4 文献标识码: A

In-situ measurement of N_2O concentration from profile of loess soil

LIANG Dong-Li^{1,*}, WU Qing-Qiang², LI Sheng-Xiu¹, FANG Ri-Yao¹, Ove Emteryd³, Tord Magnusson³

1 Northwest A & F University, College of Resources & Environment Sciences, Shaanxi 712100, China

2 Northwest A & F University, College of Horticulture, Shaanxi 712100, China

3 Swedish University of Agricultural Sciences, Sweden, Umea 90183

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1421 ~ 1427.

Abstract: Using soil probe techniques, we in situ measured changes of N_2O concentration at different soil depths of loess soil profile in a long term field experiment were measured from 1999 to 2001. The experimental results proved denitrification in deep layer of loess soil. Meanwhile, N_2O concentration in soil profiles had remarkable temporal and spatial variation. The annual N_2O concentration variation changed with the climate condition and management practice. There was higher N_2O concentration in soil profiles in the year when the annual precipitation was higher than normal. N_2O peaks often appeared after the irrigation or rainfall. The average N_2O concentration during corn growing season was greater than that during winter wheat season, mainly due to the higher temperature and rainfall amount in the summer season. The N_2O concentration in the soil profiles were in the order of $60\text{cm} \approx 90\text{cm} \approx 150\text{cm} > 30\text{cm} > 10\text{cm}$ for control treatment, and those in the order of $60\text{cm} > 90\text{cm} \approx 150\text{cm} > 30\text{cm} > 10\text{cm}$ for N fertilized treatment. The subsoil denitrification was the main N_2O source of subsoil in loess soil. Applying nitrogen fertilizer would definitely increase N_2O concentration in soil profiles.

Key Words: in-situ measurement; loess soil; N_2O emission; soil profile; denitrification

土壤是温室效应气体的主要源和库^[1], 这些气体可产生于土壤表层、亚表层甚或母质层以及地下水中^[2], 但对表层和亚表层土壤的相对贡献至今尚不清楚。 N_2O 气态损失相对于总的氮素损失是微不足道的, 但对整个农业生态系统中 N_2O 排放却是非常重要的^[3], 大约 70% 人类活动源的 N_2O 来源于土壤^[4]。硝化

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(30230230); 国家科技攻关资助项目(2002BA516A02)

收稿日期: 2007-10-03; 修订日期: 2008-08-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dongliliang2005@yahoo.com

和反硝化作用是土壤中 N_2O 形成的两个最主要的生物化学过程^[5]。

对土壤剖面中同一地点不同土层 N_2O 气体浓度的季节变化进行常年监测,有助于了解 N_2O 在土壤中产生的时间、位置、在土壤中消耗以及排放到大气中的情况;搞清土壤剖面不同土层反硝化过程,不仅有助于更好地了解土壤 N_2O 库、源及其产生机理,并对采取针对性措施减少 N_2O 的排放和 NO_3^- 淋溶具有重要的意义。尽管已有研究注意到亚表层土壤的反硝化作用对土壤 N_2O 排放的重要性^[6,7],但迄今为止国内外对有关亚表层土壤反硝化的原位测定的研究结果极少^[8,9]。本文报道了 1999 ~ 2001 年在陕西杨凌国家黄土肥力及肥料效益监测试验站进行的土壤剖面不同层次中 N_2O 排放的定位研究的结果,以期为黄土性土壤小麦玉米生产中氮素循环和管理提供科学依据。

1 试验地点和试验方法

1.1 试验地点的概况

试验区海拔 400 m;年均温度 13 ~ 15 °C;年降水量 550 ~ 700 mm,主要集中在 7 ~ 9 月份,约占全年降水的 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,成土母质为黄土,主要耕作土壤为塬土。试验布置在陕西杨凌国家黄土肥力和肥料效益监测试验站,试验地为匀地 3a 后的灌溉地。采用小麦、玉米轮作,一年两熟。管理按大田耕作、灌溉和施肥方式。试验地 0 ~ 200 cm 土体土壤物理性粘粒高于 230 g kg⁻¹;0 ~ 20 cm 土壤有机质含量是 6.253 g kg⁻¹,全氮为 1.43 g kg⁻¹, NO_3^- -N 为 3.97 mg kg⁻¹,土壤的孔隙度以 60 ~ 120 cm 土层最低,pH 8.24。试验时间为 1999 年 3 月至 2001 年 10 月,共计 30 个月,包括 3 料玉米和 2 料半小麦。

1.2 田间原位测定

设不施肥(对照)和施肥 2 个处理。施肥者,于 1999 年小麦起身拔节期(3 月 6 日)施入 240 kg N hm⁻²;于 7 月 9 日玉米拔节期施入 180 kg N hm⁻²;10 月初小麦播种前施入 240 kg N hm⁻²和 90 kg P₂O₅ hm⁻²;2000、2001 年玉米、小麦播种时的施肥量与前一年相同,肥料在播前均匀撒施,然后用人工犁翻入。为了证实土壤反硝化作用的存在并对不同土层反硝化量进行比较,氮源均用 KNO₃。试验采用大区,无重复,小区面积为 300m²。试验期间,1999 年 8 月 10 日和 8 月 20 日灌溉两次,灌水量高达 180 mm,2001 年在玉米和小麦生长季按照当地生产管理的要求进行了灌溉。 N_2O 的原位测定采用随机分布,重复 3 次。测定采用防水透气探头(长 24 cm、内径 6 mm、外径 8 mm 聚乙烯塑料管,外裹一层防水透气的 PTFE)^[12]。试验布置前挖好长 2 m、宽 1.1 m 和深 1.7 m 土壤剖面,根据黄土性土壤的剖面特点,分别在 10,30,60,90 cm 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,并用土固定之。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,末端连接一个两通的气阀,用于采集气体样品。挖出的土壤按原土层回填。每 2 周或遇雨(灌溉)后(冬季取样时间为 1 月 1 次),用 2 ml 的气密性注射器(CODAN APS)抽取气体样品。

1.3 气体样的采集及分析

气体样品用 2mL 注射器抽取,用丁基橡胶堵住针眼及时分析。对采样所用注射器的气密性进行了检验,方法是用注射器抽取已知浓度的 N_2O 标准气放置不同时间后测定 N_2O 浓度并与标准值比较,结果表明在取样后 6 h 内样品的测定结果几乎无差异,24 h 后 N_2O 损失 20%。分析仪器采用美国产 Varian 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 N_2O 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),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 L⁻¹ N_2O ,另外用瑞典产浓度为 328.2 μl L⁻¹ 的标准气体进行校正,样品稀释用 99.999% 的高纯氮气。气相色谱测定 N_2O 的变异系数小于 5%

2 试验结果及分析

由图 1 知黄土性土壤不同土层 N_2O 产生存在明显的年度和季节变异,且这种变异与气候条件及农业生产管理措施的变化有关。

2.1 施肥和对照区 N₂O 排放差异

1999~2001 年,玉米和小麦生长期间土壤剖面中 N₂O 浓度变化情况见表 1~表 3。由表 1~表 3 可见,无论是小麦生长季还是玉米生长季,不同土壤剖面中施肥处理各个层次的 N₂O 浓度均高于对照处理对应的层次,即施肥处理各土层产生的 N₂O 量无论是在玉米生长期或者是在小麦全生育过程中均显著高于对照处理对应各层;同时测定中施肥处理 N₂O 浓度的变异均明显高于对照处理。由于本研究中施入的肥料为硝态氮肥,除了来源于降水和大气干沉降中氮产生的 N₂O 外,对照处理产生的 N₂O 主要来源于土壤氮的矿化作用产生的铵态氮和硝态氮,因此可认为施肥处理相对于对照处理 N₂O 排放量的增加是土壤中 NO₃⁻ 反硝化作用的结果。本试验结果有力地证实了黄土性土壤反硝化作用的存在,且土壤剖面中 N₂O 的产生和排放具有明显的时间和空间变异特点,施肥显著地增加了土壤 N₂O 的排放量。

表 1 不同年份土壤剖面各层土壤 N₂O 浓度的变化

Table 1 Changes of N ₂ O concentrations in different soil depths in 3 years (μl L ⁻¹)				
土层深度 Soil depth (cm)	1999 (n = 23)		2000 (n = 14)	
	对照处理 Control plot	施肥处理 Fertilized plot	对照处理 Control plot	施肥处理 Fertilized plot
10	439.6 ± 99.0 (d, C) *	506.1 ± 162.5 (d, C)	398.9 ± 62.1	474.3 ± 82.0
30	504.9 ± 102.3 (c, B)	724.6 ± 332.0 (c, B)	451.8 ± 83.3	600.9 ± 89.1
60	649.6 ± 155.0 (a, A)	1094.6 ± 557.2 (a, A)	558.9 ± 39.3	910.0 ± 235.5
90	603.0 ± 177.3 (ab, A)	947.4 ± 433.1 (ab, A)	529.3 ± 63.6	777.7 ± 140.7
150	595.5 ± 143.2 (b, A)	911.1 ± 292.9 (b, A)	496.5 ± 79.8	654.5 ± 70.7
土层深度 Soil depth (cm)	2001 (n = 12)		1999~2001 (n = 49)	
	对照处理 Control plot	施肥处理 Fertilized plot	对照处理 Control plot	施肥处理 Fertilized plot
10	447.9 ± 79.6 (c, B)	532.4 ± 134.2 (c, C)	430.8 ± 86.6	504.1 ± 137.5
30	511.9 ± 132.8 (b, B)	730.8 ± 420.4 (b, BC)	497.4 ± 108.0	705.5 ± 316.0
60	583.1 ± 133.0 (a, A)	1032.2 ± 452.8 (a, A)	609.3 ± 132.9	1030.3 ± 464.3
90	539.1 ± 132.2 (ab, A)	895.9 ± 241.2 (ab, AB)	567.8 ± 146.0	889.8 ± 336.7
150	532.7 ± 109.2 (b, A)	760.5 ± 220.2 (b, B)	563.7 ± 126.1	806.1 ± 259.1

表 2 玉米生长季土壤剖面中 N₂O 的变化

Table 2 Changes of N ₂ O concentration in soil profiles during different corn growing season (μl L ⁻¹)				
土层深度 Soil depth (cm)	1999 (n = 16)		2000 (n = 6)	
	对照处理 Control plot	施肥处理 Fertilized plot	对照处理 Control plot	施肥处理 Fertilized plot
10	469.1 ± 101.4 (d, C)	547.1 ± 169.1 (d, C)	438.8 ± 61.3 (d, C)	493.20 ± 90.6 (d, D)
30	541.5 ± 93.9 (c, B)	783.2 ± 368.4 (bc, B)	499.1 ± 86.8 (bc, B)	630.2 ± 78.6 (c, C)
60	689.7 ± 148.1 (a, A)	1152.5 ± 630.3 (a, A)	570.2 ± 36.8 (a, A)	957.9 ± 188.7 (a, A)
90	650.3 ± 179.9 (ab, A)	959.2 ± 437.0 (ab, A)	565.9 ± 43.1 (ab, A)	834.0 ± 142.0 (ab, B)
150	634.5 ± 142.1 (b, A)	892.2 ± 286.5 (b, B)	541.4 ± 79.7 (b, B)	675.0 ± 71.7 (b, C)
土层深度 Soil depth (cm)	2001 (n = 9)		3 料总和 (n = 31)	
	对照处理 control plot	施肥处理 fertilized plot	对照处理 control plot	施肥处理 fertilized plot
10	481.8 ± 78.9	584.3 ± 68.3	469.8 ± 85.3 (d, D)	549.6 ± 151.4
30	558.0 ± 138.4	911.3 ± 85.3	542.8 ± 98.3 (c, C)	797.1 ± 374.6
60	641.4 ± 151.8	1163.4 ± 209.8	653.1 ± 133.3 (a, A)	1143.5 ± 573.5
90	597.5 ± 98.6	950.9 ± 216.0	624.0 ± 153.1 (b, AB)	946.8 ± 354.7
150	594.3 ± 119.0	809.8 ± 141.0	610.1 ± 126.8 (b, B)	840.8 ± 259.2

2.2 不同年度 N₂O 的变化

3a 的试验结果(表 1)表明:同一土壤 N₂O 的排放受土壤气候条件(温度和降水)和生产管理措施的影响

表3 小麦生长季土壤剖面中 N_2O 的变化Table 3 Changes of N_2O concentration in soil profiles during different winter wheat growing season ($\mu\text{L L}^{-1}$)

土层深度 Soil depth (cm)	1999 ($n = 5$)		2000 ($n = 7$)	
	对照处理 Control plot	施肥处理 Fertilized plot	对照处理 Control plot	施肥处理 Fertilized plot
10	406.2 $\pm$ 67.3	422.6 $\pm$ 93.2	370.3 $\pm$ 32.2	445.8 $\pm$ 84.1
30	458.1 $\pm$ 79.8	577.3 $\pm$ 167.4	418.6 $\pm$ 58.8	554.9 $\pm$ 97.0
60	637.1 $\pm$ 159.1	955.9 $\pm$ 478.5	541.4 $\pm$ 81.7	767.3 $\pm$ 244.3
90	601.2 $\pm$ 232.5	924.2 $\pm$ 407.2	493.2 $\pm$ 66.7	680.8 $\pm$ 140.7
150	583.1 $\pm$ 128.5	924.2 $\pm$ 345.8	475.7 $\pm$ 53.7	663.4 $\pm$ 136.4
土层深度 Soil depth (cm)	2001 ($n = 8$)		3 料总和 ($n = 20$)	
	对照处理 Control plot	施肥处理 Fertilized plot	对照处理 Control plot	施肥处理 Fertilized plot
10	407.0 $\pm$ 76.4 (b, B)	427.1 $\pm$ 67.8 (c, C)	357.0 $\pm$ 93.5 (d, D)	417.8 $\pm$ 121.1 (d, D)
30	480.8 $\pm$ 113.7 (a, A)	566.3 $\pm$ 105.6 (bc, B)	412.5 $\pm$ 121.9 (c, C)	546.9 $\pm$ 166.0 (c, C)
60	544.1 $\pm$ 97.5 (a, A)	882.7 $\pm$ 271.2 (a, A)	522.6 $\pm$ 147.9 (a, A)	827.7 $\pm$ 313.5 (a, A)
90	511.4 $\pm$ 87.4 (a, A)	796.8 $\pm$ 199.9 (ab, AB)	467.4 $\pm$ 120.7 (b, B)	772.9 $\pm$ 330.6 (b, AB)
150	519.2 $\pm$ 109.6 (a, A)	669.1 $\pm$ 111.1 (b, B)	479.8 $\pm$ 117.0 (b, B)	727.5 $\pm$ 283.5 (b, B)

* 括号中小大写字母分别代表 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 的显著性 the bigger letter and small letter in the parenthesis indicate $P < 0.01$ and $P < 0.05$ statistical significance

响,其具有显著的年度变异性。由图 1 可知,各个土层中,对照处理和施肥处理土壤剖面中各个层次 N_2O 浓度(除 10cm 和 30cm 以 2001 年稍高外)均以 1999 年为最高,其测定值波动范围分别为 $319.5 \sim 996.4 \mu\text{L L}^{-1}$ 和 $320.6 \sim 2467.3 \mu\text{L L}^{-1}$,与之形成明显对比的是 2000 年的结果较低,两个处理测定值的波动范围为 $312.0 \sim 648.4$ 和 $365.3 \sim 1309.2 \mu\text{L L}^{-1}$,最低测定值与 1999 年基本相同,而施肥处理的最高测定值仅为 $1309.2 \mu\text{L L}^{-1}$,与上一年相比下降了 46.94%,如若把剖面中 N_2O 排放情况与同时期降水变化结合起来就不难发现,这是由于两年降水量及灌溉方面的巨大差异所引起的,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,而 N_2O 的高峰值恰巧出现在灌溉后;而 2000 年的年降水量仅为 380 mm,严重低于本地区年平均的降水量水平(550 ~ 600 mm),因而水分因子成为 N_2O 形成的一个限制因子。为了进一步证实试验结果,2001 年继续了这个试验,并且在玉米和小麦生长期分别灌溉,土壤剖面中 N_2O 浓度测定结果与 1999 年接近,即各土层 N_2O 浓度明显高于 2000 年,对照和施肥处理的 N_2O 度的最高测定值分别为 $778.3 \mu\text{L L}^{-1}$ 和 $2126.6 \mu\text{L L}^{-1}$ 。也就是说土壤剖面中 N_2O 浓度的年度变化主要取决于年降水量或者灌溉情况。

2.3 季节变化受作物生长的影响

作物通过根系分泌物和根系细胞脱落物对土壤微生物活动的刺激作用;作物根系活动消耗 O_2 从而改变土壤微生物区系 pH 值;作物生长对土壤中无机氮和水分吸收;根系生长影响到土壤大孔隙的形成有利于气体的排放。不同种类作物,上述几方面的影响也不同,因此不同作物生长季节土壤反硝化作用进行的强度不同。

表 2、表 3 的比较可以看出,同一年中两料作物玉米和小麦生长季的 N_2O 浓度也存在差异,从各层土壤 N_2O 浓度平均值来看,无论是对照或者施肥处理,玉米生长季的土壤剖面各层 N_2O 浓度均高于小麦生长期。这是因为玉米生长于温度较高的夏、秋季,此时温度高,植物生长旺盛,根系分泌物增加,土壤温度和水分条件适于微生物繁殖生长;土壤残留的根茬等有机物料已基本分解,其中有效碳被微生物利用,同时玉米生长季是本地区的雨季,降水较多,而较高的反硝化作用通常与降水或者灌溉形成的较高的土壤孔隙含水量相关。这些都为反硝化作用的发生提供了条件,因此玉米生长季田间 N_2O 排放量高于小麦生长期。Mahmood^[10]发现玉米生长期反硝化作用常发生在灌溉 12 h 后,而小麦生长季则需要较长的时间,究其原因主要是土壤温

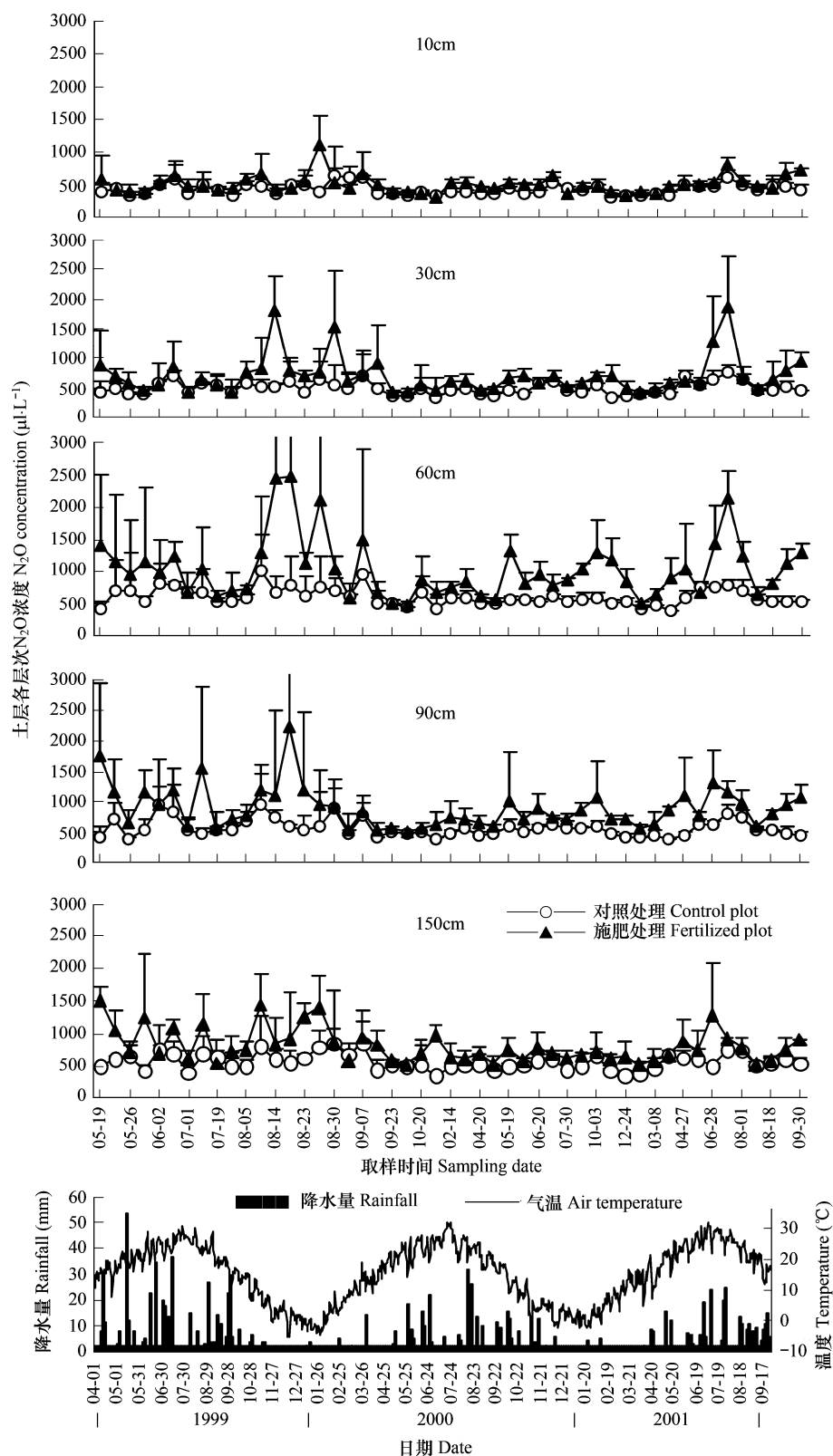


图1 试验期间土壤剖面 N_2O 浓度变化及日平均温度和降雨量变化情况

Fig. 1 Changes of N_2O concentrations in soil profiles of loess soil and daily air temperature and precipitation variation during experimental period

度较低,使得 O_2 的消耗量下降,从而反硝化时间延长的结果。

2.4 土壤剖面各层 N_2O 浓度的变化

把每个土层作为一个处理而把每次测定值作为重复进行的不同年度、玉米以及小麦生长季各层 N_2O 排放量统计结果见表 1~表 3,由表 1~表 3 可知,对照和施肥处理各个土层 N_2O 浓度间存在差异,除有些年份或某料作物,由于测定中变异较大统计分析差异不显著外,其余均给出了各个层次间显著性检验的结果。统计分析结果表明:土壤剖面各个层次 N_2O 浓度的变化以 60cm 土层为最高,10cm 土层为最低,对照处理各个层次的变化顺序为 60cm $\approx$ 90cm $\approx$ 150cm $>$ 30cm $>$ 10cm,施肥处理为 60cm $>$ 90cm $\approx$ 150cm $>$ 30cm $>$ 10cm(图 1)。施肥和对照区不同土层 N_2O 排放的差异主要来源于土壤剖面中 NO_3^- 累积量的不同:对照区土壤 N_2O 主要来源于土壤的矿化作用中产生的铵态氮和硝态氮,60cm 以下 3 个层次硝态氮含量接近均很小(平均 $< 3 \text{ mg kg}^{-1}$,详细数据未给出);而施肥处理土壤 NO_3^- 主要累积在 40~100cm 土层^[11],因而 60cm 以下土壤也有较高的 N_2O 产生。土壤剖面中不同土层 N_2O 的分布主要源于不同土层的环境条件。60~120 cm 为黄土性土壤的粘化层,土壤粘粒含量显著高于其它土层,孔隙度最低($< 18\%$),有着通气不良的自然基础^[12];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 N_2O 气体也不容易向外扩散。表层土壤 N_2O 浓度较低,其主要原因是由于表层土壤疏松,利于产生的土壤气体向外逸散,再加上生长的农作物对土壤水分和无机氮的吸收,因而表层土壤反硝化量较低。本试验说明黄土性土壤反硝化作用主要发生在 60cm 以下土壤,或者说深层土壤 N_2O 的主要来源是土壤的反硝化作用。

3 讨论

本研究证实了黄土性土壤反硝化作用的存在,其产生的 N_2O 排放有着明显的时间和空间变化规律。表现为 N_2O 浓度受土壤气候条件(温度和降水)和生产管理措施的影响,在丰水年明显高于亏水年;由于各个作物生长季节生长特点和气候特点的不同,玉米生长季土壤剖面各层 N_2O 排放量显著高于小麦生长季,且 N_2O 排放峰常出现在灌溉或者降水后;剖面中不同土层 N_2O 的变化在对照处理为 60cm $\approx$ 90cm $\approx$ 150cm $>$ 30cm $>$ 10cm,而对施肥处理为 60cm $>$ 90cm $\approx$ 150cm $>$ 30cm $>$ 10cm,亦即深层土壤 N_2O 的主要来源是土壤的反硝化作用。对土壤可溶性有机碳的研究表明,有效碳可淋溶到较深的土层,这可能是深层土壤反硝化微生物重要的碳素来源^[13],Volz^[14]也推测根区由根系分泌物以及细胞脱落物形成的有机碳可随土壤 NO_3^- 一同下渗,这无疑增加了根区以下土壤 NO_3^- 的反硝化损失,因而深层土壤反硝化作用为黄土性土壤深层 N_2O 的主要来源也就不难理解。

已有研究表明:许多因子和农业生产措施影响 N_2O 的排放^[15],土壤温度和土壤水分影响土壤中许多转化过程是影响土壤 N_2O 产生的主要因子^[16],另外施用氮肥增加了土壤 N_2O 的排放量^[15]。土壤 N_2O 排放的日变化与土壤温度波动有关^[17],但也有人提出土壤温度的昼夜变化不足以引起 N_2O 浓度如此大的波动,而可能与昼夜光合作用变化引起的根系分泌的碳水化合物变化有关^[18]。土壤 N_2O 浓度的季节变化则与土壤干湿交替、冻融交替所引起的土壤微生物死亡、气候因素等有关^[19]。这些都使得 N_2O 释放具有瞬时集中的特点,时间变异系数可达 100~350%^[20],释放速率变化范围在 0~155 gN h⁻² d⁻¹ 之间^[21],因此对一个土壤 N_2O 排放的原位和长期测定尤为重要。

尽管所有年份或作物生育期各个土层的 N_2O 浓度平均值间存在明显差异,但由于测定中存在的巨大变异,有些年份或者作物生长期间的差异不显著。究其原因主要是:其一,土壤 N_2O 的产生和消耗包含了几个微生物学过程,有很多微生物参与了这个过程,最主要的是土壤的硝化菌和反硝化菌^[22];其次,这些过程发生于极不均一的土壤环境中,这就导致控制其产生过程的因子如土壤矿质碳、土壤湿度、 NO_3^- 的有效性等等的极大变异,而土体的不均一性又导致土壤中气体扩散的差异,因此这些影响因子均直接或间接地影响这些过程^[6];再次,土体的这种不均一性在一个地区是随时间呈现动态变化的^[20],因此仅就几个地方的测定结果,很难推断整个地区的情况。

References:

- [1] Duxbury J M. The significance of agricultural sources of greenhouse gases. *Fert. Res.*, 1994, 38: 151 — 163.
- [2] Rice C W, Smith M. Denitrification in no-till and plowed soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1982, 46: 1168 — 1199.
- [3] Flessa H, Pfau W, Dorsch P, *et al.* The influence of nitrate and ammonium fertilization on N_2O release and CH_4 uptake of a well drained topsoil. *Z. Pflanzenernaehr Bodenkd*, 1996, 159: 499 — 503.
- [4] 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.
- [5] Abbasi M K, Adams W A. Gaseous N emission during simultaneous nitrification-denitrification associated with mineral N fertilization to a grassland soil under field conditions. *Soil Biol Biochem*, 2000, 32: 1251 — 1259.
- [6] Parkin T M, Meisinger J J. Denitrification below the crop rooting zone as influenced by surface tillage. *Journal of Environment Quality*, 1989, 18: 12 — 16.
- [7] Yeomans J C, Bremner J M, McCarty G W. Denitrification capacity and denitrification potential of subsurface soils. *Communication in Soil Science and Plant Analyses*, 1992, 23: 919 — 927.
- [8] 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.
- [9] Zhu G Y, Zahng F S, Li X H. Study on the denitrification in the subsoil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(4): 379 — 384.
- [10] 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.
- [11] Liu D Q, Yang Y X, Zhang H. *et al.* The characteristic of nitrate movement and influential factors on Lu soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(4): 379 — 384.
- [12] Liang D L, Tong Y A, Ove Emteryd. *et al.* The primary study on the in site measurement of profile N_2O emissions. *Acta Pedology*, 2002, 38(6): 802 — 809.
- [13] Eichner M J. Nitrous oxide emissions from fertilized soils; summary of available data. *J Environ Qual*, 1990, 19: 272 — 280.
- [14] Maag M, Vinther F P. Nitrous oxide emission by nitrification and denitrification in different soil types and different soil moisture contents and temperature. *Appl. Soil Ecol.*, 1996, 4: 5 — 14.
- [15] Conrad R, Seiler W, Bunse G. Factors influencing the loss of fertilizer nitrogen into the atmosphere as N_2O . *J. Geophys Res.*, 1983, 88: 6709 — 6718.
- [16] Christensen S. Nitrous oxide emissions from a soil under permanent grass, seasonal and diurnal fluctuations as influenced by manuring and fertilization. *Soil Biol Biochem*, 1983, 15: 531 — 536.
- [17] Christensen S, Simkins S, Tiedje J M. Spatial variation in denitrification: dependency of activity centers on the soil environment. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1990, 54: 1608 — 1613.
- [18] Schoenar, Bettany. Organic matter leaching as a component of carbon, nitrogen, phosphorus and sulfur cycles in a forest, grassland and gleyed soils. *Soil Sci Soc Am J*, 1987, 51: 646 — 651.
- [19] Volz M G, Ardakani M S, Schulz R K, *et al.* Soil nitrate loss during irrigation: enhancement by plant roots. *Agron. J.*, 1976, 68: 621 — 627.
- [20] Goodroad L L, Keeney D R. Nitrous oxide emissions from soils during thawing. *Can. J. Soil Sci.*, 1984, 64: 187 — 194.
- [21] Kaiser E A, Kohrs K, Kucke M, *et al.* Nitrous oxide release from arable soil: importance of potential forage crops. *Biol Fertil Soil.*, 1998, 28: 36 — 43.
- [22] Fireston M K, Fireston R B, Tiedje J M. Nitrous oxide from soil denitrification. Factors controlling its biological production. *Science*, 1980, 208: 749 — 751.

参考文献:

- [9] 邹国元, 张富锁, 李新慧. 下层土壤反硝化作用的研究, *植物营养与肥料学报*, 2000, 7(4): 379 ~ 384.
- [11] 吕殿青, 杨学云, 张航, 等. 陕西黄土中硝态氮运移特点及影响因素. *植物营养与肥料学报*, 1987, 2(4): 289 ~ 296
- [12] 梁东丽, 同延安, Ove Emteryd, 等. 黄土性土壤剖面中 N_2O 气态损失的研究初报. *土壤学报*, 2002, 38(6): 802 ~ 809.