

玉米生长期黄土区土壤氧化亚氮产生和排放及其影响因子研究

梁东丽^{1a}, 李生秀^{1a}, 吴庆强^{1b}, 张兴昌^{1a}, Ove Emteryd²

(1 西北农林科技大学 a 资源环境学院, b 园艺学院, 陕西 杨凌 712100;

2 瑞典农业大学 森林生态系, 瑞典 乌默奥 90183)

[摘要] 采用土壤平衡气室法和密闭气室法, 对玉米生长期对照(不施氮肥)和施氮处理(180 kg/hm²N)黄土区土壤剖面中N₂O浓度和土壤表面N₂O排放通量的变化及其影响因子进行了研究。结果表明, 在玉米生长期, 土壤剖面中N₂O主要产生于7月和8月, 且60 cm土层的N₂O浓度最高, 10 cm土层最低; 施用氮肥不仅增加了土壤剖面中N₂O的浓度, 而且增加了土壤表面N₂O的排放通量, 玉米生长期对照和施氮处理的土壤表面N₂O平均排放通量分别为(10.95±4.13)和(22.41±8.69) μg/(m²·h)。对照和施氮处理土壤剖面中N₂O浓度和土壤表面N₂O排放通量的变化趋势相同, 但施氮处理土壤剖面中N₂O浓度和N₂O排放通量均明显高于对照。土壤温度、水分以及土壤NO₃⁻-N含量是土壤N₂O产生和排放的主要影响因子。

[关键词] 黄土区土壤; 玉米生长期; N₂O浓度; N₂O排放通量

[中图分类号] S153; X13

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)02-0131-07

The production and emission of N₂O and influential factors in the corn growing season of loess soil

LIANG Dong-li^{1a}, LI Sheng-xiu^{1a}, WU Qing-qiang^{1b}, ZHANG Xin-chang^{1a}, EMTERYD Ove²

(1 a College of Resources & Environment Sciences, b College of Horticultural Sciences, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Swedish University of Agricultural Sciences, Sweden, Umeå 90183)

Abstract: By using soil probes and enclosed chamber methods, N₂O concentration in the soil profile, N₂O fluxes on soil surface and influential factors of control treatment (no fertilizer added) and fertilized treatment (applied 180 kg/hm²N) were studied during the corn growing season of loess soil. The results showed that during the corn growing season, both N₂O concentrations in soil profiles and N₂O fluxes on the soil surface were mainly produced in July and August. The highest N₂O concentration in the soil profile existed in the 60 cm soil layer while the lowest in the 10 cm for both treatments. The application of nitrogen fertilizer not only could increase N₂O concentration in the soil profile but also raise N₂O fluxes on the soil surface. The average N₂O flux for control treatment and fertilized treatment were (10.95±4.13) and (22.41±8.69) μg/(m²·h) during the whole corn growing season respectively. The variation of N₂O concentration in the soil profile and N₂O fluxes on the soil surface for control and fertilized treatment were similar, but the values of the fertilized treatment were obviously higher than that of the control treatment. Soil temperature, soil moisture content and NO₃⁻-N contents were main factors affecting both N₂O production and emission.

Key words: Loess soil area; corn growing season; N₂O concentration; N₂O emission flux; influential factor

[收稿日期] 2006-01-13

[基金项目] 国家自然科学基金项目(30230230); 国家“十五”科技攻关项目(2002BA516A02)

[作者简介] 梁东丽(1963-), 女, 陕西铜川人, 副教授, 博士, 主要从事土壤环境化学和环境监测研究。

N_2O 不仅是一种重要的温室效应气体,对温室效应的贡献率为5%^[1]。而且其对臭氧层还有一定程度的破坏^[2]。由土壤的硝化和反硝化作用产生的 N_2O 量,占总 N_2O 量的80%^[3-4]。土壤是 N_2O 主要的源和库^[5]。土壤表面、土壤剖面中的其他土层和母质层及地下水中均能产生 N_2O ^[6]。此外,有研究已注意到亚表层土壤反硝化作用对 N_2O 的贡献^[7],但是对表层和亚表层土壤产生 N_2O 的相对重要性尚不清楚^[8]。

土壤表面 N_2O 的排放通量是土壤中 N_2O 产生、消耗、扩散和溶解在土壤溶液中的结果总和^[9],因此影响 N_2O 产生的许多环境因子对 N_2O 的排放速率也有影响^[10]。在一个给定的土壤体系中,氧气、 NO_3^-N 、土壤有机氮直接影响土壤中 N_2O 的产生和排放,而土壤水分、温度和质地等则间接影响这些过程的发生,只有搞清影响 N_2O 产生及排放的物理、化学及生物学等因素,才能采取相应的措施减少 N_2O 的产生和排放。有关轮作、除草剂、氮肥种类、土壤水分等对东北、华北和华东等地区土壤 N_2O 产生和排放的影响已有报道^[11-15],但对黄土区土壤 N_2O 产生和排放因子的研究还未见有系统的报道。

本试验于2001年在陕西杨凌国家黄土肥力和

肥料效益监测试验站对玉米生长期土壤 N_2O 产生、排放及其影响因子进行了研究,以期为提高氮肥利用率提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试品种 试验所用玉米品种为户单4号,由陕西杨凌西北农林科技大学农学院提供。

1.1.2 供试土壤 本研究于2001年在陕西杨凌五泉国家黄土肥力和肥料效益监测试验站进行。土壤为塬土,0~200 cm 土层土壤物理性粘粒230 g/kg,60~120 cm 土层的土壤孔隙度最低(<18%),pH 8.24。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验设不施氮肥(对照)和施氮肥(以下简称施氮处理)2个处理。试验前施氮处理和对照的土壤化学性质见表1。施氮处理:在玉米生长期(06-06播种,10-01收获),于07-05施入180 kg/hm²N,N源为KNO₃,此前连续3年的施氮处理均相同。于07-09和08-16分别对对照和施氮处理灌溉1次。试验采用大区,无重复,大区面积为322 m²。试验区的其他生产管理措施与大田相同。

表1 试验地土壤化学性质

Table 1 Chemical properties of test soil

处理 Treatment	有机质/ (g · kg ⁻¹) Organic matter	全氮/ (mg · kg ⁻¹) Available N	硝态氮/ (mg · kg ⁻¹) NO ₃ ⁻ N content	速效磷/ (mg · kg ⁻¹) Available P	速效钾/ (mg · kg ⁻¹) Available K
施氮处理 N treatment	11.72	0.1351	37.3	14.3	120.2
对照 CK	9.28	0.1147	4.8	15.2	113.4

1.2.2 田间原位测定 田间原位测定又分为采用土壤平衡气室法(纵向测定土壤剖面不同土层 N_2O 浓度)及采用密闭气室法(横向测定土壤表面 N_2O 排放通量)。

(1)土壤剖面不同土层 N_2O 浓度的测定。在对照和施氮处理的试验大区中随机布设3个取样点。采用防水透气探头(即长24 cm、内径6 mm 和外径为8 mm 聚乙烯塑料管,外裹一层防水透气的PTFE薄膜)测定土壤剖面不同土层 N_2O 浓度^[16]。根据黄土区土壤剖面的特点,分别在3个取样点10,30,60,90和150 cm 5个土层(在玉米行间)安装防水透气探头。每个防水透气探头末端连接外径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。在玉米生长期,分别于05-28,06-28,07-13,08-01,08-16,08-18,09-04,09-30 取样,取样时间为每天上午08:00~10:00。

(2)土壤表层 N_2O 排放通量的测定。选用体积为16 L 的静态箱^[17],每处理随机布设10个重复,其中一半位于玉米行间,另一半位于玉米株间。在玉米生长期,分别于06-26,07-13,07-15,07-17,08-01,08-16,08-18,09-04,09-30 取样,取样时间为每天上午08:00~10:00。 N_2O 的排放通量用Hutchinson 和Moiser 方程计算^[9]。

1.2.3 样品采集及分析 (1)气体样品的采集及分析。气体样品用2 mL 气密性注射器抽取,用橡胶头堵上针眼并迅速分析。气体分析采用美国Varian 产GC3800 气相色谱仪,标准气为北京产9.6 mL/L

N₂O, 此外用瑞典产浓度为328 2 μL/L 的标准气体进行校正, 用99.999%的高纯氮气进行样品稀释。气相色谱仪测定N₂O 的变异系数小于5%。

(2) 土壤样品的采集和NO₃-N 含量测定。于06-26, 07-14, 07-22, 08-19, 09-03 和 09-30 分别取0~200 cm 土层(20 cm 为1层)的土样进行土壤NO₃-N 含量测定。测定具体方法为称取混匀的新鲜土壤样品10 g, 加入1 mol/L KCl 浸提液50 mL, 振荡30 min 后过滤, 将滤液在Tector 5020 流动注射分析仪上测定NO₃-N 含量, 同时用重量法测定土壤含水率, 考虑到土壤孔隙对气体扩散的影响, 根据土壤密度和土壤容重将土壤含水量折合成土壤孔隙含水量(water filled pore space, WFPS):

$$\text{土壤孔隙含水量}/\% = (\text{土壤含水率} \times \text{土壤容重}) / (\text{土壤孔隙度} \times \text{水的比重}) \times 100\%;$$

$$\text{土壤孔隙度}/\% = (1 - \text{土壤容重}/\text{土壤比重}) \times 100\%。$$

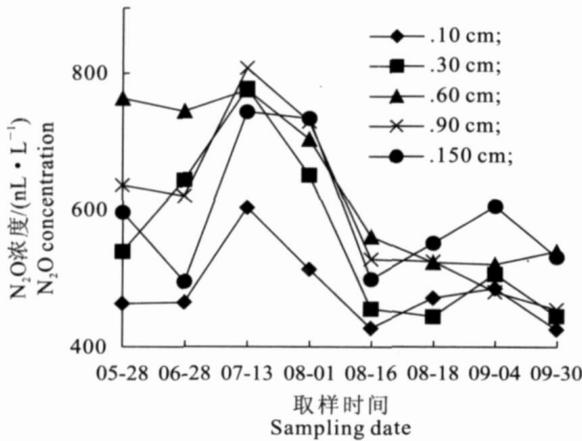


图1 玉米生长期对照土壤剖面中N₂O 浓度的变化

Fig. 1 N₂O concentration in the soil profile of control plot

由图1 和图2 还可知, 在土壤剖面的不同土层中, 对照和施氮处理的平均N₂O 浓度均以60 cm 土层最高, 10 cm 土层最低。其中, 施氮处理60 cm 土层N₂O 平均浓度为1 232.3 nL/L, 变幅较大, 为632.1~2 126.6 nL/L; 而10 cm 土层N₂O 平均浓度为595.8 nL/L, 变幅较大, 为443.2~807.6 nL/L。对照60 cm 土层N₂O 平均浓度为623.9 nL/L, 变幅较小, 为519.9~775.8 nL/L; 10 cm 土层的N₂O 平均浓度仅为484.4 nL/L, 变幅较小, 为425.4~603.6 nL/L。表明土壤N₂O 浓度在土壤剖面底层变幅较大, 而表层土壤的N₂O 浓度变幅较小, 且N₂O 浓度

1.2.4 气温、降水量及土壤温度测定 气温、降水量资料均来源于陕西杨凌五泉国家黄土肥力和肥料效益监测试验站的自动记录气象站。采用土壤温度计分别测定5, 10, 15 和20 cm 土层的温度, 分别于每天上午08:00、中午12:00 和晚上20:00 记录3次, 取3次的平均值。

2 结果与分析

2.1 玉米生长期黄土区土壤剖面N₂O 浓度的变化

由图1 和图2 可知, 在玉米生长期, 与对照相比, 施氮处理土壤剖面N₂O 浓度变化较大, 为443.2~2 126.6 nL/L, 其N₂O 浓度最高值是对照最高值的2.63倍; 对照土壤剖面不同土层N₂O 浓度变化较小, 为425.4~807.7 nL/L。说明在玉米生长期氮肥反硝化产生的N₂O 是土壤排放N₂O 的重要来源。

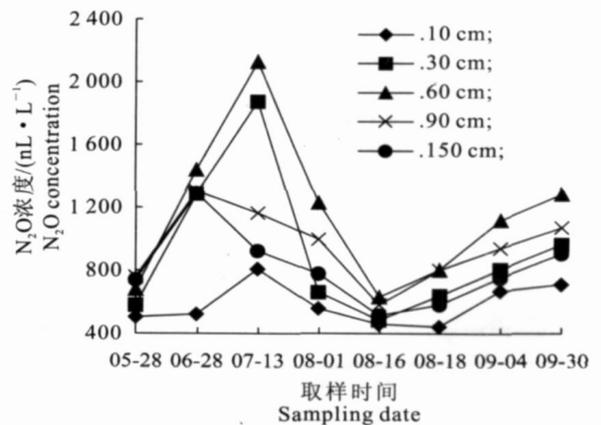


图2 玉米生长期施氮处理土壤剖面中N₂O 浓度的变化

Fig. 2 N₂O concentration in the soil profile of N treatment plot

较低, 这与Burton 等^[10]和Clough 等^[18]的研究结果一致。这也反映出黄土区土壤中N₂O 的产生主要是60 cm 土层, 说明亚表层土壤是土壤N₂O 产生的重要来源, 因此在估算氮素损失量时必须考虑亚表层土壤的贡献。

由图1 和图2 还可知, 土壤剖面中N₂O 最高浓度出现在施肥灌溉后的07-13, 除玉米生育末期的09-30外, 以08-16的N₂O 浓度最低。

2.2 玉米生长期黄土区土壤表面N₂O 排放通量的变化

由图3 可知, 在玉米生长期, 对照的N₂O 平均排

放通量为 $(10.95 \pm 4.13) \mu\text{g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$, 施氮处理为 $(22.41 \pm 8.69) \mu\text{g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$; 对照和施氮处理的 N_2O 最高排放通量均出现在施肥及灌溉后的07-13。对照的 N_2O 排放通量代表了供试土壤在自然矿化条件下的 N_2O 逸出量, 而施氮处理较对照增加的 N_2O 排放通量, 则可视为由施用氮肥引起的 N_2O 逸出量。

与前人的研究相比, 本研究施氮处理的 N_2O 平均排放通量与华北平原冬小麦-玉米轮作期的 N_2O 排放通量 $(25.8 \mu\text{g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2))$ 接近^[19], 却显著低于东北地区玉米生长期 N_2O 平均排放通量 $(50 \sim 75 \mu\text{g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2))$ ^[20]。本研究结果表明, N_2O 的逸出高峰主要发生在施肥及灌溉后的一段时间内。Clayton 等^[21]发现, 多数 N_2O 逸出高峰均在施入硝态氮肥3周后出现。有研究表明, 在土壤积水时, N_2O 的逸出高峰出现在施肥1周后^[22]。

经计算可知, 本研究对照的 N_2O 平均排放通量

空间变异系数为12.8%~28.5%, 平均为23.5%; 而施氮处理的 N_2O 平均排放通量空间变异系数为18.56%~53.36%, 平均为36.9%。由此可知, 施氮处理 N_2O 排放通量具有很大的空间变异性, 这主要是由于土壤有效氮和土壤水分分布不均所致。Mosier 等^[23]和 Bremner 等^[24]在测定不同土壤 N_2O 排放通量时也得到类似的空间变异系数。

由图3还可知, 在07-09灌溉后的07-13~07-17, 无论是对照还是施氮处理的 N_2O 排放通量及其变异系数均随灌溉后时间的延长而降低; 07-13, 07-15和07-17对照 N_2O 排放通量的变异系数分别为42.89%, 32.94%和22.99%, 而施氮处理分别为59.27%, 29.42%和18.56%。这可能是因为灌溉后土壤水分分布不均匀, 引起 N_2O 浓度变异系数较大, 之后随灌溉时间延长, 土壤水分经下渗、侧渗等重新分布, N_2O 的变异系数减小。

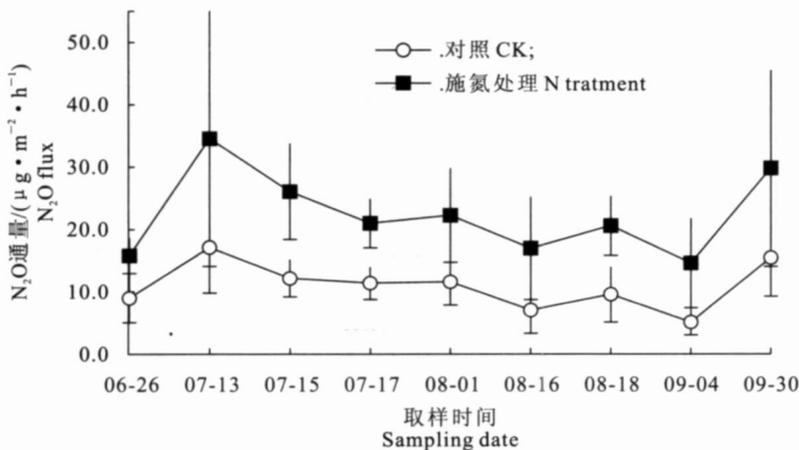


图3 玉米生长期对照和施氮处理土壤表面 N_2O 排放通量的变化

Fig. 3 N_2O flux changes of CK and N treatment in the corn growing season

2.3 影响玉米生长期黄土区土壤 N_2O 产生和排放的主要因子

2.3.1 气温和降水量 由图4可知, 在玉米生长期, 平均气温为23.8, 最高和最低气温分别为32.0和11.9。其中7月的平均气温最高, 为27.8, 9月的平均气温最低, 为18.4, 其余两月的平均气温约为24.0。玉米生长期的总降水量为278.4mm, 其中9月的降水量最高, 为93.47mm, 占玉米整个生长期总降水量的1/3。比较图1~4可知, 玉米生长期的7月和9月, 施氮处理土壤剖面 N_2O 浓度和土壤表面 N_2O 排放通量均较8月高, 这可能是较高的气温或水分为土壤反硝化作用提供了适宜的

条件所致。

2.3.2 土壤温度 通常认为硝化菌和反硝化菌最适生长温度为25~35, 如果不存在其他环境因素的限制, 在一定的温度范围内, 其生长代谢能力随温度升高而增强。由图5可知, 在玉米生长期, 土壤剖面中不同土层的温度变化趋势均相同, 即6~7月, 土壤温度总体逐渐升高, 8~9月, 土壤温度总体逐渐降低, 其中以7月的土壤平均温度最高, 而7月土壤剖面中不同土层的 N_2O 浓度和土壤表面 N_2O 排放通量均高于其他月(图1~3), 这可能是因为7月的土壤温度是硝化菌和反硝化菌最适生长的温度, 促进了土壤硝化作用和反硝化作用的进行, 从而直

接影响 N_2O 的产生和排放。由图5可知,在玉米生长期,5 cm 土层的土壤温度变化最大,变幅为 $10.5 \sim 34.6$, 20 cm 土层土壤温度的变幅相对较小,因此相对而言20 cm 土层更有利于硝化和反硝化作用

的进行,这可能也是表层土壤 N_2O 浓度低于20 cm 土层的原因之一。由此可知,土壤温度是土壤 N_2O 产生和排放的主要影响因子。

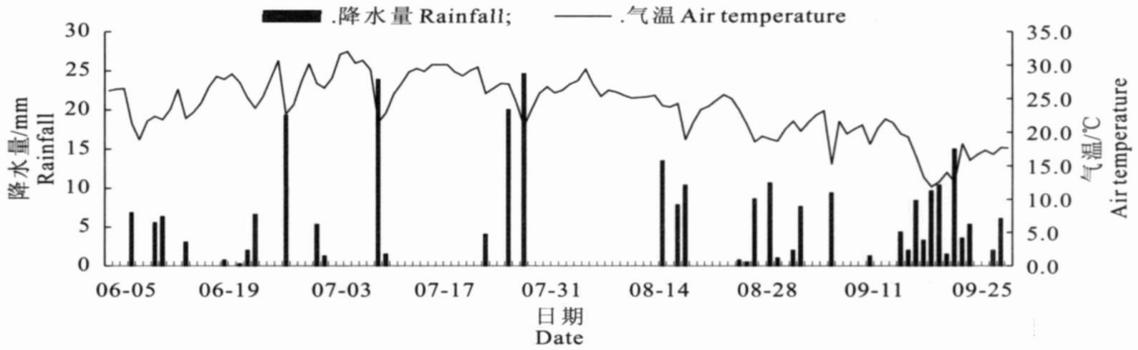


图4 玉米生长期气温和降水量的变化

Fig. 4 Air temperature and rainfall changes during corn growing season

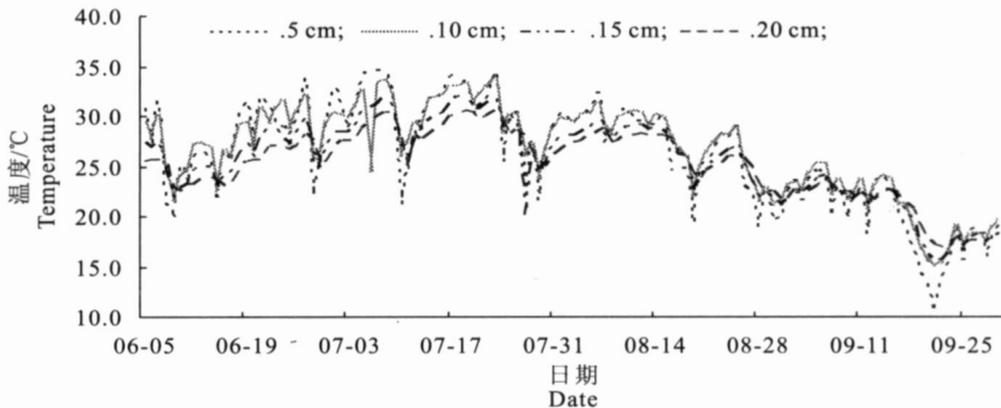


图5 玉米生长期土壤温度的变化

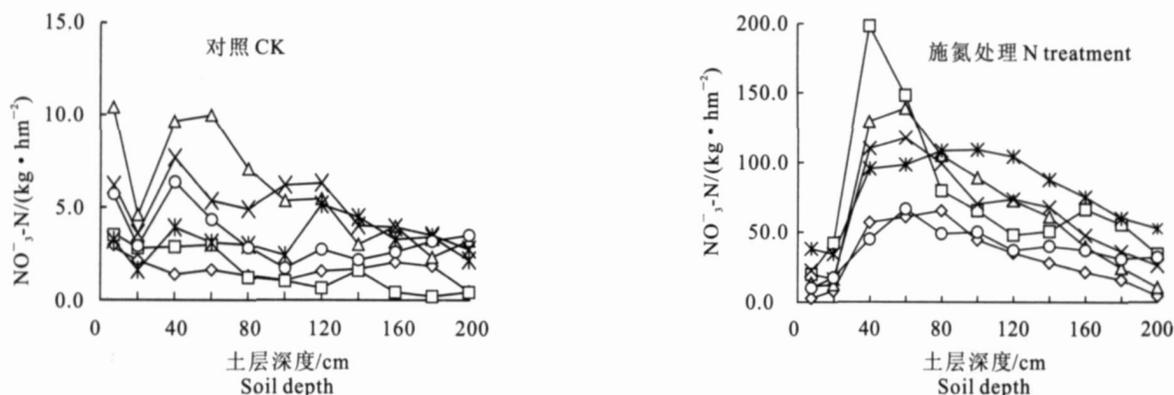
Fig. 5 Soil temperature changes during corn growing season

2.3.3 土壤 NO_3^-N 含量 图6表明,施氮处理在0~200 cm 土层,不同采样日期的土壤 NO_3^-N 含量均呈先升高达最大值后又逐渐降低的趋势,整个采样期间土壤 NO_3^-N 含量为 $2.98 \sim 198.0$ mg/kg;在整个采样期对照土壤的 NO_3^-N 含量变幅不大,为 $0.24 \sim 10.4$ mg/kg,这可以部分地解释为何施氮处理土壤表面的 N_2O 排放通量及其变异系数均高于对照。

由图2,3,6可知,施氮处理中,最高 NO_3^-N 含量出现在07-14,这与土壤剖面中最高 N_2O 浓度出现的时间(07-13),以及土壤表面最高 N_2O 排放量出现的时间(07-13)基本一致。由此可知,土壤 NO_3^-N 含量是土壤 N_2O 产生和排放的主要影响因子。

2.3.4 土壤孔隙含水量 由图7可知,在玉米生长

期0~200 cm 土层中,对照和施氮处理在0~20 cm 土层的土壤孔隙含水量(WFPS)均较低;在20~40 cm 土层土壤孔隙含水量均随土层深度的增加而增大,这与表层土壤水分被作物吸收和水分蒸发等有关;之后随着土层深度的增加,土壤孔隙含水量均呈波动性变化。对照和施氮处理土壤孔隙含水量的2个高峰分别出现在40~80 cm 土层和120~140 cm 土层,而玉米生长期黄土区土壤剖面中最高 N_2O 浓度出现在60 cm 土层(图1,2),这与土壤孔隙含水量第一个高峰出现的土层基本一致。由图7还可知,7月份采集土样的土壤孔隙含水量均高于8月份,而7月份土壤剖面60 cm 土层 N_2O 浓度和土壤表面 N_2O 排放通量较8月份高(图1~3)。由此可知,水分是土壤 N_2O 产生和排放的主要影响因子。

图6 玉米生长期土壤剖面中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量的变化

—◇—.06-26; —□—.07-14; —△—.07-22; —*—.08-19; —×—.09-03; —○—.09-30
Fig. 6 $\text{NO}_3\text{-N}$ content changes in soil profiles of corn growing season

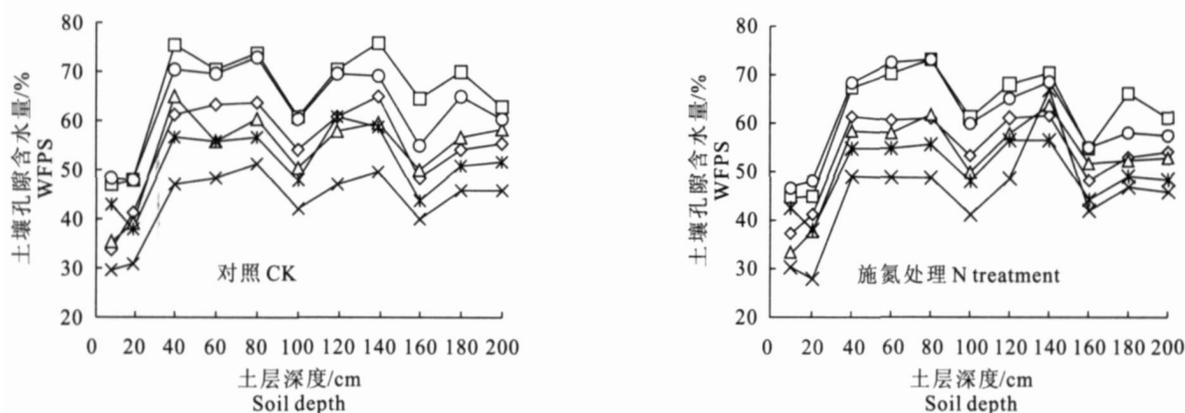


图7 玉米生长期土壤剖面中孔隙含水量的变化

—◇—.06-26; —□—.07-14; —△—.07-22; —*—.08-19; —×—.09-03; —○—.09-30
Fig.7 WFPS changes in the soil profile during the corn growing season

3 结论与讨论

本研究结果表明,黄土区0~150 cm土壤剖面中存在反硝化作用,其中10 cm土层 N_2O 浓度较低,30~90 cm土层的 N_2O 浓度较高,且施氮处理土壤剖面中 N_2O 浓度产生的高峰期与表面 N_2O 排放通量的高峰期基本一致,即在施肥及灌溉后的短期内出现;与对照相比,施氮处理土壤剖面中 N_2O 浓度和土壤表面 N_2O 排放通量均明显增加,说明施用氮肥增加了土壤剖面中 N_2O 的浓度,从而增加了土壤表面 N_2O 的排放通量;另外亚表层土壤也是黄土区土壤 N_2O 的重要来源。要准确估算土壤 N_2O 的排放通量,仅仅测定表层土壤 N_2O 排放通量是不够的,还必须考虑亚表层土壤的贡献。

对一个给定的农业土壤体系,因为经常施用氮肥,底物 $\text{NO}_3\text{-N}$ 通常不缺^[25],而适宜的温度和水分条件促进了微生物的活动,因此土壤温度、水分

以及土体中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量可能是决定土壤 N_2O 产生和排放的主要影响因子。由本研究可知,在施肥及灌溉后,土壤剖面中 N_2O 浓度和表层土壤的 N_2O 排放通量均较高。这可能是因为灌溉扰动了土壤,从而影响了土壤的物理和生物学过程,促进了土壤的反硝化作用,产生了较多的 N_2O ,使 N_2O 的浓度增加;此外灌溉产生的渗透水能够延迟 N_2O 扩散到较深的土层,使土壤变湿后可在瞬间产生 N_2O 浓度高峰值,而在短期内增加了表层土壤 N_2O 的排放通量^[26]。有研究表明, N_2O 逸出的极高变异取决于取样时间的选择^[22],因此有必要对灌溉后土壤 N_2O 排放通量进行连续测定,以便准确地预测 N_2O 的排放通量。研究表明,由于土壤结构复杂,即使在比较干燥的情况下,也会有局部缺氧区域^[27],所以本研究在玉米生育期土壤含水量较低时,对照土壤表面也有一定的 N_2O 排放通量。因此,减少土壤中 N_2O 的排放通量,必须考虑到农业生产措施,如灌溉和

施肥的影响

理论上,对同一个地点土壤剖面中不同土层气体浓度进行测定,可较好地估算表面产生的气体排放通量。根据Fick's定律可知,气体排放通量是浓度梯度和扩散系数的函数,土壤中 N_2O 排放通量取决于土壤中 N_2O 的浓度梯度而不是其总量。本试验在测定不同土层 N_2O 浓度梯度的同时,未能同时测定土壤气体扩散速率,因而无法用剖面中 N_2O 浓度梯度计算 N_2O 排放通量,所以无法将平衡气室法和密闭气室法测定的 N_2O 排放通量进行比较。

[参考文献]

- [1] Mosier A R. Soil processes and global change[J]. *Biol and Fertil of Soils*, 1998, 27: 221-229
- [2] Chang C, Janzen H H, Cho C M, et al Nitrous oxide emission through plants[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1998, 62: 35-38
- [3] Bremner J M, Blackmer A M. Nitrous oxide: emissions from soils during nitrification of fertilizer nitrogen [J]. *Science*, 1978, 199: 295-296
- [4] Isemann K. Agriculture's share in the emission of trace gases affecting the climate and some cause-oriented proposals for sufficiently reducing this share [J]. *Environ Pollut*, 1994, 83 (1/2): 91-111.
- [5] Duxbury J M. The significance of agricultural sources of greenhouse gases[J]. *Fert Res*, 1994, 38: 151-163
- [6] Rice C W, Smith M. Denitrification in no-till and plowed soils [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1982, 46: 1168-1199
- [7] 黄国宏, 陈冠蓄, 韩冰, 等. 土壤含水量与 N_2O 产生途径的研究[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(1): 53-56
- [8] Rudolph J, Conrad R. Flux between soil and atmosphere, vertical concentration profiles in soil, and turnover of nitric oxide 2 Experiments with naturally layered soil cores[J]. *J Atmos Chem*, 1996, 23: 275-300
- [9] Henault C, Devis X, Page S, et al Nitrous oxide emissions under different soil and land management conditions[J]. *Biol Fertil Soils*, 1998, 26: 199-207.
- [10] Burton D L, Beauchamp E G. Profile nitrous oxide and carbon dioxide concentration in a soil subject to freezing[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1994, 58: 115-122
- [11] 陈书涛, 黄耀, 郑循华, 等. 轮作制度对农田氧化亚氮排放的影响及驱动因子[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(10): 2053-2060
- [12] 丁洪, 王跃思. 除草剂对氮肥反硝化损失与 N_2O 排放的影响[J]. *中国环境科学*, 2004, 24(5): 596-599
- [13] 黄国宏, 陈冠蓄, 韩冰, 等. 土壤含水量与 N_2O 产生途径的研究[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(1): 53-56
- [14] 黄耀, 蒋静艳, 宗良纲, 等. 种植密度和降水对冬小麦田 N_2O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2001, 22(6): 20-23
- [15] 华璐, Vinten A J A, 郑海金. 不同有机物料对土壤 N_2O 排放的影响与调控[J]. *中国环境科学*, 2004, 24(4):
- [16] 梁东丽, 同延安, Ove Emteryd, 等. 黄土性土壤土壤剖面中 N_2O 气态损失的研究初报[J]. *土壤学报*, 2002, 38(6): 802-809.
- [17] 梁东丽, 同延安, Ove Emteryd, 等. 蔬菜地不同施氮量下 N_2O 逸出量的研究[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2002, 30(2): 73-77.
- [18] Clough T J, Jarvis S C, Dixon E R, et al Carbon induced subsoil denitrification of ^{15}N -labelled nitrate in 1m deep soil columns[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31: 31-41.
- [19] 曾江海, 王智平, 张玉铭, 等. 小麦-玉米轮作期土壤排放 N_2O 通量及其总量估算[J]. *环境科学*, 1995, 16(1): 32-35
- [20] 黄国宏, 陈冠学, 张志明, 等. 玉米田 N_2O 排放及减排措施研究[J]. *环境科学学报*, 1998, 18(4): 344-349
- [21] Clayton H, McTaggart T P, Parker J, et al Nitrous oxide emission from fertilized grassland- a year study of the effects of N fertilizer form and environmental condition [J]. *Biol Fertil Soils*, 1997, 25: 252-260
- [22] Mulvaney R L, Khan S A, Mulvaney G S. Nitrogen fertilizer promote denitrification [J]. *Biol Fertil Soils*, 1997, 24: 211-220
- [23] Mosier A R, Hutchinson G L. Nitrous oxide emissions from cropped fields[J]. *J Environ Qual*, 1981, 10: 169-173
- [24] Bremner J M, Breitenbeck G A, Blacker A M. Effect of anhydrous ammonia fertilization on emission of nitrous oxide from soils[J]. *J Environ Qual*, 1981, 10: 77-80
- [25] Beauchamp E G, Trevor J T, Paul J W. Carbon sources for bacterial denitrification[J]. *Adv Soil Sci*, 1989, 10: 113-142
- [26] Brumme R, Beese F. Effects of liming and fertilization on emission of CO_2 and N_2O from a temperate forest [J]. *J Geophys Res*, 1992, 97: 12851-12858
- [27] 陈家坊. 关于硝化和反硝化过程 II: 反硝化过程的条件和化学脱氮[J]. *土壤*, 1974(2): 82-89