# 作物对黄土性土壤氧化亚氮排放的影响
## ——根系与土壤氧化亚氮排放

丁 琦, 白红英*, 李西祥, 路 莉
西北大学 环境科学系, 陕西 西安 710127)

**摘要**: 以冬小麦田耕作层原状土为研究对象, 采用了室内培养实验的方法, 观测了小麦生长期不同阶段根系对土壤 $N_2O$ 排放的影响, 及对土壤 $N_2O$ 排放的水、热效应的影响。结果表明, 在实验的各个时期土壤 $N_2O$ 平均排放通量麦田均高于休耕地, 在孕穗期麦田 $N_2O$ 排放通量出现最大值; 而随根系质量和活性下降, 生殖后期 $N_2O$ 排放量减少。小麦主根区与行间土壤 $N_2O$ 排放量存在差异, 其主要表现在孕穗期, 行间 $N_2O$ 排放通量是主根区的 5.64 倍, 但开花期和成熟期差异表现并不明显。在小麦开花期和成熟期土壤 $N_2O$ 排放温度效应受作物根系的影响显著, 而孕穗期不明显。小麦根系对水分效应影响主要集中表现在 15 ~20cm 的土层。同时, 研究还发现种植小麦使土壤中 $N_2O$ 排放的主要区域扩大。

**关键词**: 作物; 土壤 $N_2O$ 排放; 影响效应; 根系
**文章编号**: 1000-0933 (2007) 07-2823-09 **中图分类号**: X13 **文献标识码**: A

# The effects of crop on $N_2O$ emission from loess soil: roots and $N_2O$ emission from soil

DING Qi, BAI Hong-Ying*, LI Xi-Xiang, LU Li
*Northwest University, Department of Environmental Sciences, Shaanxi, Xi'an* 710127, *China*

***Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (7): 2823 ~ 2831.**

**Abstract**: A laboratory soil incubation experiment, was conducted using soil from a wheat field in Shaanxi Province, to study, the influence of wheat roots soil moisture and temperature on $N_2O$ emission from soil. The results indicated that. $N_2O$ flux was higher in soil containing wheat plants compared to unplanted (fallow) treatments during the entire growth period. Maximum $N_2O$ flux occurred at the booting stage, and then decreased as root activity decreased in later growth stages. $N_2O$ emission in the main root-zone and the inter-row was different. The largest differences occurred at the booting stage, when the flux of $N_2O$ between plants was 5.64 times more than in the main root-zone. There was no difference in $N_2O$ emission form planted and unplanted treatments at flowering and maturity. During the latter two stages, temperature effects due to wheat roots had a significant effect on $N_2O$ emission. Moisture effects due to roots were significant in the 15 — 20cm layer. The results also indicated that $N_2O$ increased due to the activity of wheat roots in the soil.

**Key Words**: crop; $N_2O$ emission from soil; influential effect; roots

---

**基金项目**: 陕西省自然科学基金资助项目 (2006D02); 西北大学科学研究资助项目 (0kyqdf123)
**收稿日期**: 2006-10-10; **修订日期**: 2007-03-30
**作者简介**: 丁琦 (981 ~), 男, 陕西洋县人, 硕士生, 主要从事环境化学研究. E-mail: dingqi_mail@yahoo.com.cn
* **通讯作者** Corresponding author. E-mail: hongyingbai@163.com
**Foundation item**: The project was financially supported by Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China (No. 2006D02) and research project of Northwest University (No. 0kyqdf123)
**Received date**: 2006-10-10; **Accepted date**: 2007-03-30
**Biography**: DING Qi, Master candidate, mainly engaged in environmental chemistry. E-mail: dingqi_mail@yahoo.com.cn

目前,大气中痕量气体浓度对全球气候变化的影响备受关注,$N_2O$ 是其中最受关注的气体之一。据估计,$N_2O$ 全球增温潜势值(GWP)是参照气体 $CO_2$ 的 296 倍,对全球温室气体效应的贡献为 6%[1],Rodhe 的研究指出,1mol$N_2O$ 的增温效应是 $CO_2$ 的 150~200 倍[2],可以在大气中滞留 114a[1],还可通过光化学反应与 $O_3$ 发生反应,破坏臭氧层[5]。

Bounwman 的研究表明,农业土壤和热带地区土壤对全球 $N_2O$ 排放贡献率高达 70%[4],其中农业生产活动对 $N_2O$ 排放的贡献,占人为总排放量的 70% 左右[5]。目前,农田生态系统 $N_2O$ 排放的研究集中于宏观因子的探讨,如气候因子、耕种和管理方式、施肥量、施肥种类等对 $N_2O$ 排放的影响[6~9]然而,关于作物根系微环境对 $N_2O$ 排放影响的研究较少。作物根系活动显著影响土壤中硝化和反硝化微生物的活动,改变微生物活动的土壤生态环境[10~12],同时影响土壤 $N_2O$ 的排放。因此,作物根系对农田生态系统 $N_2O$ 排放影响的研究意义重大。本文以西北地区黄土性土壤小麦田和休耕小区为研究对象[13],为了减少大田试验中各影响因子造成的误差,采用室内模拟试验,对影响因子进行单一化处理,分别寻求每一影响因子对 $N_2O$ 产生和排放过程的影响,研究西北地区土壤 $N_2O$ 排放的效应因子受作物根系影响的程度、途径及机理,为西北旱作区 $N_2O$ 排放的研究提供理论依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 材料与设计

本试验土壤样品取自渭河三级阶地的西北农林科技大学Ⅰ试验站(08°38′N,35°42′E)。试验期,小麦生育期内积温为 1200℃,年降雨量为 632mm,而小麦生长期(10 月 15 日~翌年 6 月 5 日)内降水量为 115.6mm。试验小区种植冬小麦。播种时,以氮肥 150kgN·$hm^{-2}$、磷肥 40kgP·$hm^{-2}$ 作基肥,一次施入麦田与休耕地的耕作层并混合、耙匀。小麦整个生长期未进行人为灌水。基本性状:质地为重壤,容重 1.32 g·$cm^{-3}$,pH(水土比 1:1)7.89,碳酸钙含量 92.6 g·$kg^{-1}$,有机质 11.47 g·$kg^{-1}$,全氮 0.75 g·$kg^{-1}$,$NO_3^-$-N 含量为 15.1mg·$kg^{-1}$,$NH_4^+$-N 为 8.5 mg·$kg^{-1}$,田间持水量(质量分数)为 22%。

试验土样为小麦田主根区和行间原状土壤及休耕地原状土壤,培养试验土壤水分为试验区田间持水量的 65%(即中等水分的下限,含水量为 14.5%)。试验设温度、深度、湿度 3 个因子:温度为小麦生育旺盛期对应的田间平均温度 15,20,25℃;深度为 5,10,15,20cm 4 个深度,水分含量分别为 14.5%(中等含水量),18.7%(高含水量),22%(田间持水量)。原状土培养试验设计见表 1。

表 1 原状土培养试验

Table 1 Incubation experiment of soil

| 生长期 Stage | | 孕穗期 Booting | | | 开花期 Flowering | | | 成熟期 Mature | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 田间温度 Field temperature(℃) | | 14.18~15.14 | | | 19.80~21.86 | | | 23.93~24.90 | | |
| 培养温度 Incubation temperature(℃) | | 15 | | | 20 | | | 25 | | |
| 土壤深度 Soil depth(m) | 5 | a | – | c | a | – | c | a | – | c |
| | 10 | a | b | c | a | b | c | a | b | c |
| | 15 | a | – | c | a | – | c | a | – | c |
| | 20 | a | – | c | a | – | c | a | – | c |

a:小麦田行间原状土壤,b:小麦田主根区原状土壤,c:休耕地原状土壤 a:Wheat soil of inter-row,b:Wheat soil of main root-zone,c:soil of follow;以下 a、b、c 所表示与表 1 相同,a、b、c(below)are as same as table 1

### 1.2 测定方法

(1)室内原状土培养试验 在小麦生育旺盛期的 3 阶段中(孕穗期、开花期、成熟期),用直径 7cm,长度为取样深度的特制不锈钢采样器,于麦田与休耕地中取 0~5、0~10、0~15、0~20cm 原状土各 3 份,上端开放,下一端用带微孔的盖子盖好,并将原状土壤湿度均调至 14.5%、18.7%、22%,装于直径 7cm,高为 20+$I$ cm 的玻璃容器内($I$ 代表装入土样的高度,为 5,10,15,20cm),密闭,分别置于田间对应温度(5℃,20℃,

25℃)下培养,以测定 $N_2O$ 释放量。每种处理设 3 个重复,每 24h 取容器中气样 1 次,取样之后,打开容器 30min 左右以平衡容器内气压,重复上述试验至培养后 10d。

(2) $N_2O$ 测定　采集培养器内气样 2ml,用 Varian GC3800 气相色谱测试,检测器为 ECD($^{63}$Ni),柱子为 Porapak Q(80/100 目),载气为 99.9999% 高纯氮,气体流量为 10ml·mol$^{-1}$标气为瑞典产 328μl·L$^{-2}$的 $N_2O$ 气体。$N_2O$ 通量计算公式:

$$F_{N_2O} = d_0 \times h \times \Delta c \ / \ \Delta t \times 273T$$

式中,$F_{N_2O}$为排放通量,$h$ 为玻璃容器内有效空间的高度,$d_0$为标准状况下 $N_2O$ 气体的密度(1.25kg·m$^{-3}$),$\Delta c/\Delta t$ 为玻璃容器内气体浓度的时间变化率,$T$ 为玻璃容器内的温度(绝对温度 K)。

## 2　结果与讨论

### 2.1　作物根系对土壤 $N_2O$ 排放的激发效应

表 2 为小麦田及休耕地不同深度土壤 $N_2O$ 平均排放通量($\bar{F}$)及二者增量比 $\Delta B$($\Delta B = (\bar{W} - \bar{F})/\bar{F}$)。由表 2 可知,小麦不同生育期,除成熟期 0~5cm,0~10cm 深度土壤外,各深度麦田土壤 $N_2O$ 平均排放通量均高于休耕地,以孕穗期二者增量比 $\Delta B$ 最大,尤以 0~10cm,0~15cm 土壤增量比率 $\Delta B$ 显著增大,达 700% 左右,且该生育期增量比 $\Delta B$ 随深度变化呈抛物线形式:

$$\Delta B_{15℃} = -0.0734h^2 + 1.8777h - 4.485 \qquad (R^2 = 0.9688)$$

结果表明,除成熟期麦田表层土壤中 $N_2O$ 排放通量稍有降低外,开花期和成熟期其余土壤增量比率 $\Delta B$ 均随土壤深度的加深而增加。开花期增量比 $\Delta B$ 随深度变化呈指数函数关系,成熟期 $\Delta B_{25℃}$-h 符合一元二次多项式:

$$\Delta B_{20℃} = 0.0159e^{0.2403h} \qquad (R^2 = 0.9837)$$

$$\Delta B_{25℃} = 0.02h^2 - 0.3278h + 1.013 \qquad (R^2 = 0.9990)$$

表 2　小麦田及休耕地不同深度土壤 $N_2O$ 平均排放通量($\bar{F}$)及二者增量比 $\Delta B$

Table 2　The ratio of $N_2O$ emission in increment and $N_2O$ emission from different soil depths of wheat and fallow

| 土壤深度* Soil depth (cm) | 孕穗期 Booting (15℃) | | | 开花期 Flowering (20℃) | | | 成熟期 Mature (25℃) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 麦田($\bar{W}$) Wheat field | 休耕地($\bar{F}$) Fallow | ($\Delta B$)** | 麦田($\bar{W}$) Wheat field | 休耕地($\bar{F}$) Fallow | ($\Delta B$)** | 麦田($\bar{W}$) Wheat field | 休耕地($\bar{F}$) Fallow | ($\Delta B$)** |
| 5 | 3.870 | 0.987 | 2.921 | 1.22 | 1.16 | 0.052 | 1.17 | 1.36 | -0.142 |
| 10 | 13.570 | 1.615 | 7.402 | 1.86 | 1.61 | 0.157 | 1.45 | 1.86 | -0.220 |
| 15 | 12.970 | 1.678 | 6.729 | 3.42 | 1.92 | 0.781 | 3.53 | 2.29 | 0.545 |
| 20 | 10.860 | 2.228 | 3.874 | 5.91 | 2.21 | 1.671 | 8.13 | 2.35 | 2.465 |

* 行间土样本 Soil sample;** $\Delta B = (\bar{W} - \bar{F})/\bar{F}$. 以下 $W$、$F$ 所示均与表 2 同 ($W$, $F$ below) are as same as Table 2

图 1 为麦田和休耕地不同深度土壤 $N_2O$ 平均排放通量及土壤 $NO_3^-$-N 含量。由图 1 可知,孕穗期、开花期麦田土壤中 $NO_3^-$-N 含量低于休耕地 $NO_3^-$-N 含量,成熟期 $NO_3^-$-N 含量大体相当,但 3 个生育期麦田 $N_2O$ 排放通量总趋势均显著高于休耕地($p = 0.027$),表明两种处理中土壤 $N_2O$ 排放量的差异不是来自反应底物 $NO_3^-$-N 含量的影响,也不是由于水热等因子的影响,因为不同生育期两种土壤培养的水热条件一致(含水量为 14.5%、15,20,25℃),因此麦田土壤 $N_2O$ 排放通量高于休耕地是受作物的影响,更确切的说是受作物根系的影响。

通过对麦田、休耕地 $N_2O$ 排放通量与 $NO_3^-$-N 含量的相关分析发现,麦田中 $N_2O$ 排放通量与麦田 $NO_3^-$-N 含量显著相关($r^2 = 0.9885$),而休耕地 $N_2O$ 排放通量与 $NO_3^-$-N 含量的相关性($r = -0.8328$,$r^2 = 0.6936$)弱于麦田,土壤中 $NO_3^-$-N 的转化受耕种活动影响显著。

根系能够激发土壤中的硝化和反硝化作用,使土壤中 $N_2O$ 产生量增加,其机理是通过根系酶的作用还是激发了土壤酶的活性目前还未能确定[4],但已确定其影响作用同作物根系的表面积或重量成正比。本试验结果也证实土壤 $N_2O$ 排放通量与作物的根系重量(干重)密切相关(图 2),孕穗期休耕地 0~5、0~10、0~15、

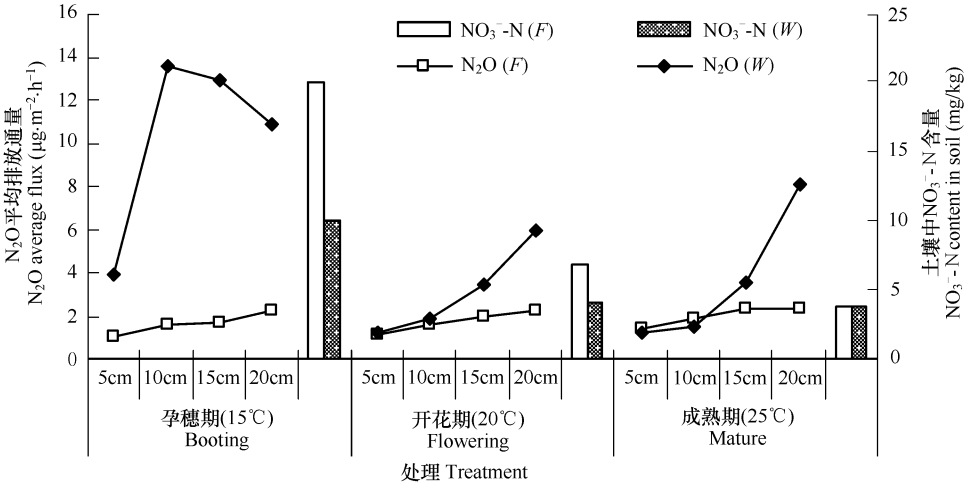


**图 1 小麦田和休耕地不同深度土壤 $N_2O$ 平均排放通量及土壤中 $NO_3^-$-N 含量**

Fig. 1 $NO_3^-$-N content in soil and $N_2O$ emission from different soil depths of wheat field and fallow

0 ~ 20cm 土壤 $N_2O$ 平均排放通量仅占麦田耕层同深度土壤 $N_2O$ 平均排放量的 26%,12%,13%,21%;从孕穗期至成熟期小麦根系重量与活性逐渐减少,根系的激发效应也逐渐下降,与开花期对应的休耕地土壤 $N_2O$ 平均排放通量为麦田耕层同深度土壤 $N_2O$ 平均排放量的 95%,86%,56%,37%;成熟期其平均排放通量是麦田耕层同深度土壤 $N_2O$ 平均排放量的 117%,128%,65%,29%。分析表明,根系重量与土壤 $N_2O$ 排放通量之间有一定的相关性 ($r^2 = 0.7677$),随着根系重量和功能的下降,纯土壤 $N_2O$ 排放量所占比例越来越大,根系激发效应减弱。

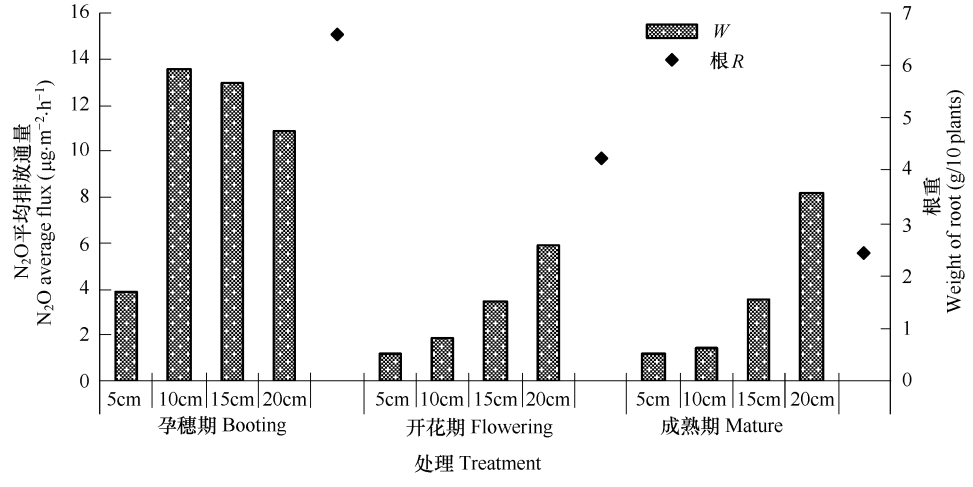


**图 2 小麦各生育期土壤 $N_2O$ 排放通量与根系的关系**

Fig. 2 The relationship between the $N_2O$ emission from wheat and roots in different growing period

## 2.2 根系对麦田土壤 $N_2O$ 排放活跃区域的影响

有研究表明,10 ~ 15cm 土层是休耕地 $N_2O$ 排放的主要场所[5],即 $N_2O$ 排放活跃区域。从图 1 可见,小麦孕穗期不同深度土壤 $N_2O$ 平均排放通量麦田均高于休耕地,0 ~ 10cm,0 ~ 15cm,0 ~ 20cm 3 个深度麦田土壤 $N_2O$ 平均排放通量的差异很小,但远大于 0 ~ 5cm 麦田土壤,并呈依次减小的反方向变化,表明在该条件下(含水量为 14.5%、15℃),5 ~ 10cm 深度土壤对 $N_2O$ 排放通量的贡献最大,小麦种植活动使土壤 $N_2O$ 排放的活跃区域被抬升。因为同期土壤水热条件一致,所以活跃区域抬升是作物根系作用的结果。

小麦开花期和成熟期不同深度土壤 $N_2O$ 排放通量呈指数增长(图 1),0 ~ 5,0 ~ 10cm 麦田土壤 $N_2O$ 平均排放量与休耕地基本相同;而 0 ~ 15cm 麦田土壤 $N_2O$ 排放量则增加迅速,利用后一个深度减前一个深度排放值得到 0 ~ 5,5 ~ 10,10 ~ 15cm 的表观排放量($\Delta f$),这时 10 ~ 15cm 土层 $N_2O$ 表观排放量占整个 0 ~ 15 cm 土层表观排放量的 45.6% 和 58.9%,这与文献[5]的结论一致,10 ~ 15cm 土层是 $N_2O$ 排放的活跃区域;值得注意的是,开花期和成熟期 0 ~ 20cm 土壤分别为其 0 ~ 15cm 土壤 $N_2O$ 排放通量的 1.7 倍和 2.3 倍;开花期 10 ~ 15cm 和 15 ~ 20cm 土壤 $N_2O$ 的表观排放量分别是占到 0 ~ 20cm 土层 $N_2O$ 排放总量的 26.4% 和 42.1%;成熟期则分别占 42.1% 和 56.7%,15 ~ 20cm 土层的 $N_2O$ 的排放显著提高,即该条件下,$N_2O$ 排放活跃区域的土壤厚度(0 ~ 20cm)和深度(20cm)均增加,未出现孕穗期较深耕层土壤 $N_2O$ 排放下降的趋势,原因可能是小麦后生育期根系开始衰退、死亡,在土壤中留下大量的根孔,这为微生物提供了良好的界面、生存条件[2,16]以及气体传导通道,而微生物旺盛的代谢活动,加速了土壤有机质(如死根)的分解,增加了土壤中的 $NO_3^-$-N 和有效碳含量,激发了深层土壤的反硝化反应,$N_2O$ 排放活跃区域厚度和深度同时增加。

## 2.3　根系微环境对土壤 $N_2O$ 排放效应的影响

图 3 为小麦不同生育期主根区与行间土壤 $N_2O$ 的排放过程,在不同生育阶段,受根系生理作用及氮素亏缺的影响,主根区与行间土壤 $N_2O$ 排放通量存在差异,尤以孕穗期差异显著($p_b = 0.0121$),主根区 $N_2O$ 排放通量仅占行间土壤的 17.76%,即 $N_2O$ 排放主要来自行间土壤,该现象一方面可能与孕穗期冬小麦生长旺盛,对氮素的吸收强度大有关[7],另一方面与主根区与行间的根系密度差异有关,植物根系可以影响土壤结构,使土壤空隙度减小[8];另外,行间土壤中分布有大量毛细根,这些活跃的毛细根系不但激发 $N_2O$ 的产生,而且使产生的 $N_2O$ 通过这些细小根系的"通道优势"作用逸出土面,形成了行间 $N_2O$ 排放通量高于主根区的现象。此时,无论土壤 $NO_3^-$-N 含量,还是小麦、根系重量与活性都高于后生长期,所以这种微区域 $N_2O$ 排放差异是由 $NO_3^-$-N 含量还是由小麦根系生理作用引起,或是二者共同促进使此现象放大还有待进一步研究。

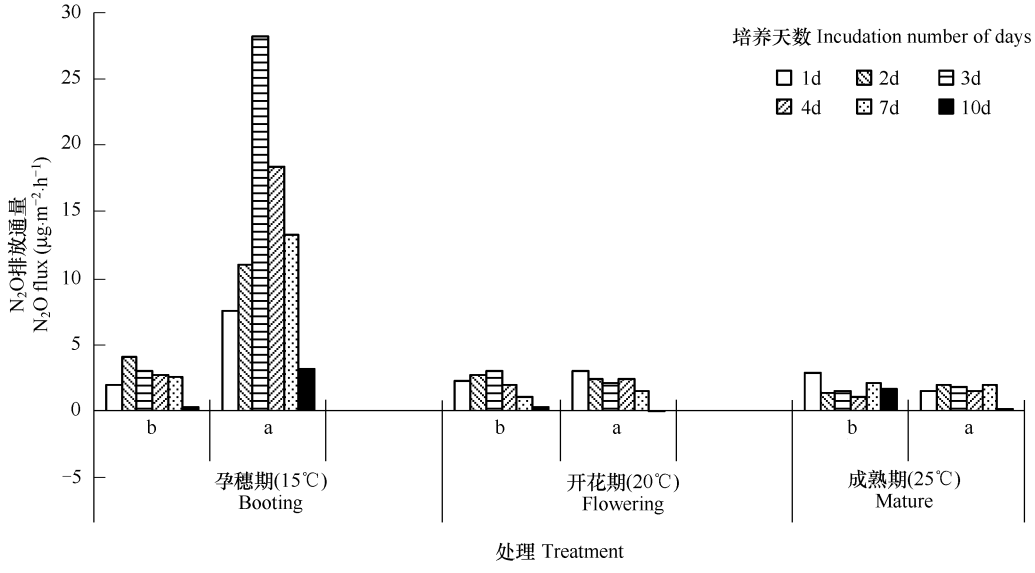


图 3　小麦不同生育期主根区与行间土壤 $N_2O$ 的排放过程

Fig. 3　The process of $N_2O$ emission in the main root-zone and the inter-row at different growing period

开花期和成熟期主根区与行间土壤 $N_2O$ 排放量差异并不显著($p_f = 0.8282$,$p_m = 0.9007$)。即旱田土壤中 $N_2O$ 主要通过土面释放,而未表现出类似于稻田土壤 $N_2O$ 释放的植株通道①。本结果与 Chang[9] 等以油菜和

① 施书莲,杜牡丹,邢光熹. 水稻植株对稻田土壤 $N_2O$ 排放的影响. 见:李振声 主编:挖掘生物高效利用土壤养分潜力　保持土壤环境良性循环论文集. 1999. 274 ~ 279.

大麦为供试植物的研究结果基本一致,他们发现在土壤田间持水量下,未测到 $N_2O$ 通过植株释放,土壤中 $N_2O$ 主要通过土面释放,但当土壤水分饱和时,两种植物均显著地促进了 $N_2O$ 释放。

## 2.4 作物根系对水热效应的影响

### 2.4.1 作物根系对热效应的影响

大量试验[10~24]证明水分和温度是影响土壤 $N_2O$ 排放的主要因子,本试验结果显示麦田与休耕地土壤 $N_2O$ 排放不仅表现在排放量的差异,也表现出对水、热等影响效应的差异。

图 4 为小麦不同生育期,不同土壤深度麦田和休耕地土壤 $N_2O$ 平均排放通量随温度变化情况,结合图 4、图 1,随温度变化各深度土壤 $N_2O$ 平均排放通量麦田均高于休耕地。孕穗期(15℃),小麦根系活性和土壤中的 $NO_3^-$-N 含量较高,麦田土壤 $N_2O$ 排放通量高于同深度开花期(20℃)、成熟期(25℃)的排放通量,而休耕地无此现象,此时根系对土壤 $N_2O$ 排放的刺激作用占主导地位,温度的影响效应不明显;此后,开花期—成熟期土壤 $NO_3^-$-N 含量逐渐降低,随着温度升高麦田土壤 $N_2O$ 排放通量的趋势与休耕地相似并高于休耕地,作物根系对土壤 $N_2O$ 排放的温度效应的影响较大。但在 0~20cm 土层中,开花期和成熟期麦田土壤 $N_2O$ 平均排放通量随温度的变化率远大于休耕地和其它 3 种深度土壤,根系对温度效应的影响显著。这种结果的原因可能在于,这个时期根系的吸收作用逐渐下降,使 $NO_3^-$-N 通过其他形式氮的转化补充[7],得到一定的恢复;同时有研究表明[25,26],土壤中有效碳质量分数是限制反硝化作用的主要因子,从图 2 可见开花期和成熟期小麦根系质量迅速下降,大量根系死亡并分解,增加了土壤中有效碳的质量分数,从而促进了深层土壤(5~20cm 土壤)的反硝化作用。加之这个时期较高的温度和植物根系形成根际效应[10,11],激发了深层土壤 $N_2O$ 的产生并使其能够迅速的扩散到大气中,不会进一步被还原成 $N_2$。

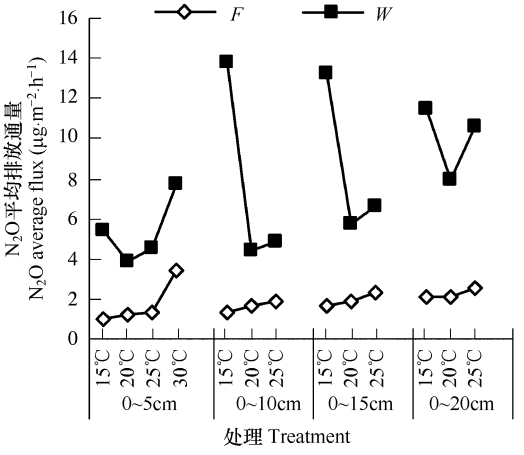


图 4 麦田和休耕地土壤 $N_2O$ 排放量随温度及深度的变化

Fig. 4 Variation of $N_2O$ emission with temperature and depth in wheat and fallow

研究表明,当温度增加到 30℃时,$N_2O$ 气体排放量产生一个飞跃[3]。从图 4 可见,0~5cm 土层 $N_2O$ 排放通量在 30℃时,出现了"跃增",与文献[3]的结论一致。对比 0~20cm 土壤,可以发现 0~20cm 土壤 $N_2O$ 排放通量的增加趋势与 0~5cm 的相似,这是否表明作物根系可以降低 $N_2O$ 排放的"跃增温度",加速了农田 $N_2O$气体排放,目前未见报道,尚需要进一步研究。

### 2.4.2 作物根系对水分效应的影响

图 5 为 25℃时麦田和休耕地土壤 $N_2O$ 平均排放通量随水分的变化情况。从图 5 可知麦田土壤在中等含水量时未表现出明显的排放优势,随着含水量的增高(4.5%~22%含水量区间),单位水分引起的 $N_2O$ 排放增量变化 $\Delta\bar{y}/\Delta W$ 为 0.028,明显高于休耕地土壤 $\Delta\bar{y}/\Delta W$ 值(0.006),其排放峰值出现在含水量为 22.0%时,而休耕地峰值出现在 18.7%时。经相关性分析,在适合作物生长的含水量区间(4.5%~22%),麦田 $N_2O$ 排放与土壤含水量的相关性显著高于休耕地($r_w^2=0.9262$,$r_f^2=0.3337$),但在整个区间上二者的差异不显著($r_w^2=0.8787$,$r_f^2=0.8611$)。这表明在一定的含水量范围内作物根系对土壤 $N_2O$ 排放水分效应的影响随着含水量的增加而提高。

图 6 为不同水分条件下麦田和休耕地土壤 $N_2O$ 排放通量的差值,从图中可以看出含水量为 14.5%时根系对土壤 $N_2O$ 排放的影响较小,主要集中在 15~20cm 的土层;当含水量为 18.7%时,各深度土层的 $N_2O$ 排放通量增量均有增加,表层土壤由于水分蒸发快,含水量下降使 0~5cm 土层 $N_2O$ 排放通量的增量很小;15~

20cm 土层的 $N_2O$ 表观排放量（$\Delta f$）增量占到了 0～20cm 土层表观排放量增量的 66.1%。即在含水量为 14.5% 和 18.7% 时,作物根系对水分影响效应均主要集中在 15～20cm 的土层。

图 7 为相同处理下高水分与低水分土壤（8.7%，14.5%）$N_2O$ 排放通量的差值,由图 7 可知,麦田土壤的 $N_2O$ 排放通量增量远大于休耕地的 $N_2O$ 排放增量,根系促进作用明显。另外,从图中可知休耕地 0～20cm 土层 $N_2O$ 排放通量增量为负值,这可能与土壤含水量增加（4.5%～18.7%）,土壤通气孔隙度减小,阻碍了深层 $N_2O$ 的排放,使得含水量为 18.7% 时的排放通量低于含水量为 14.5% 时的排放通量有关,但这种情况没有出现在麦田地里。这进一步证明了作物的根系可能通过两种途径对水分效应产生影响:①增加土壤 $N_2O$ 的产生量,促进水分效应;②改善高水分条件下土壤通气性,促进 $N_2O$ 的排放。

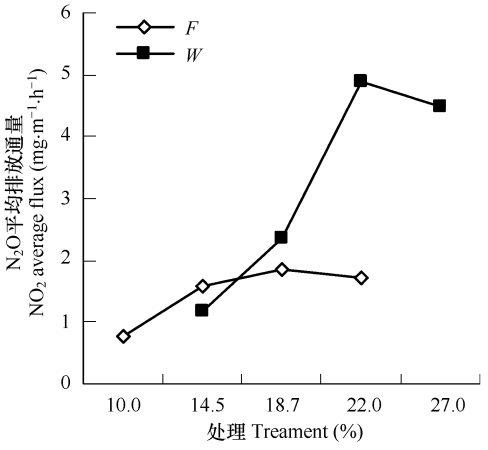


图 5　麦田和休耕地土壤 $N_2O$ 排放通量随土壤水分的变化

Fig. 5　$N_2O$ emission of wheat and fallow with variation of soil moisture

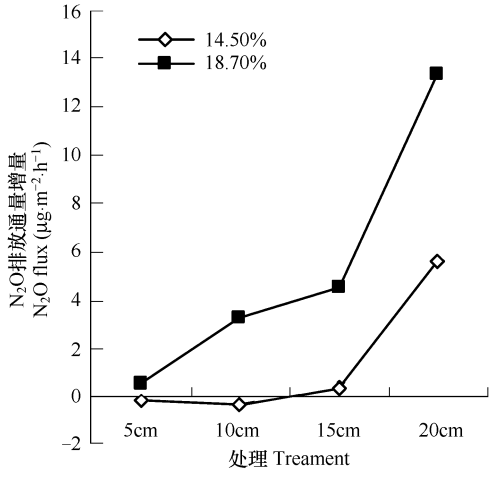


图 6　不同水分条件下麦田与休耕地 $N_2O$ 排放通量变化量 $\Delta\bar{y}$

Fig. 6　Variation of $N_2O$ emission in wheat and fallow under different water conditions

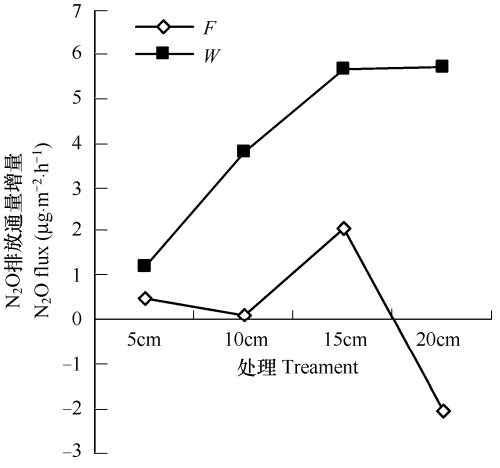


图 7　含水量为 14.5% 与 18.7% 时 $N_2O$ 排放通量差值

Fig. 7　Different of $N_2O$ emission at 14.5% and 18.7% soil moisture

## 3　结论

(1)麦田土壤 $N_2O$ 排放通量高于休耕地土壤 $N_2O$ 排放通量主要是受作物生长的影响,准确地说是受作物根系的激发作用。作物根系重量和活性都是土壤 $N_2O$ 排放的影响因子,从孕穗期到成熟期随作物根系的活力与重量的下降,根系的激发效应逐渐减小,$N_2O$ 的排放量亦逐渐下降。

(2)小麦根系的分布差异及其对氮素吸收导致 $NO_3^-$-N 分布的差异,引起作物不同根系区对促进 $N_2O$ 排放贡献的差异。在孕穗期行间土壤的 $N_2O$ 平均排放通量是主根区土壤的 5.64 倍,但在开花期和成熟期这种差异并不明显。

(3)小麦根系活动导致土壤 $N_2O$ 排放活跃区域（0～15cm）的变动。孕穗期土壤的 $N_2O$ 排放活跃区域提升到 5～10cm,开花期和成熟期 $N_2O$ 排放活跃区域的深度和厚度均增加。

(4)小麦根系可以影响水、热因子的影响效应。在孕穗期根系对土壤 $N_2O$ 排放的促进作用占主导地位,

温度的影响效应表现不明显;但在开花期和成熟期根系对土壤 $N_2O$ 排放温度效应的影响作用增大。试验还表明,麦田土壤随着水分含量的增高(4.5% ~22% 水分区间),单位水分引起的 $N_2O$ 排放增量变化明显高于休耕地,且麦田 $N_2O$ 排放峰值出现在水分含量为 22.0% 时,而休耕地出现在 18.7% 时。作物根系对水土壤 $N_2O$ 排放的分效应有影响,并随着含水量的增加而提高,其影响主要表现在 15 ~20cm 的土层。

**References:**


[1] IPCC. Climate changes 2001: the scientific Basis. Combridge, Newyork: Cambridge University Press, 2001.

[2] Rodhe H. A comparison of the contribution if various gases to the greenhouse effect. Science, 1990, 248: 1217 - 1219.

[3] IPCC. Radiative forcing of climate change. Genera: WMO/UNEP, 1994.

[4] Bounwman A F. The role of soils and land use in the greenhouse effect. Background paper of the international conference soil and the greenhouse effect. Wageningen. the Netherlands; Int. A Soil Ref. and Into. Cnt. 1989, 14 - 18.

[5] Yang L F, Cai Z C. Effects of N application and maize growth on $N_2O$ emission soil. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16 (): 100 - 104.

[6] Hua L, Vinten A J A, *et al*. Influence and control of paper waste and plant residual on $N_2O$ emission from soil. China Environmental Science, 2004, 24 (4): 464 - 468.

[7] Li Y X, Tian G M. Relationship of N-form translation and $N_2O$ emission in paddy soils under different water regime. Ecology and Environment, 2003, 12 (2): 157 - 159.

[8] Yang L F, Cai Z C. Effects of N application and maize growth on $N_2O$ emission from soil. Chin J Appl Ecol, 2005, 16 (): 100 - 104.

[9] Jiang C S, Wang Y S, Zheng X H, *et al*. Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Permanently Flooded Rice Fields in a Central Sichuan Hilly Area of Southwest China. Environmental Science, 2006, 27 (2): 208 - 213.

[0] Zou G Y, Zhang F S. Denitrification in rhizosphere and $N_2O$ emission. Journal of China Agricultural University, 2002, 7 (): 77 - 82.

[1] Shi G R. Ecological effect of plant root exudates. Chinese Journal of Ecology, 2004, 24 (): 97 - 101.

[2] Wang D L, Yi C Q. Function of root channels in the soil system. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20 (6): 869 - 874.

[3] Bai H Y, Zhang Y P. Emission Characteristic in Field Soil of Northwest Region. Journal of Agro-Environment Science, 2003, 22 (6): 561 - 564.

[4] Weier K L, Doran J W, Power J F, *et al*. Denitrification and the denitrogen / nitrous oxide ratio as affected by soil water, available carbon, and nitrate. Soil Science Soc Amer. J, 1993, 57: 66 - 72.

[5] Bai H Y, Geng Z C, Zhang Y P. Influence of ecological-environmental condition on soil phosphatase. J. of Northwest Sci-Tech Univ. of Agri and For, 2003, 31 (2): 84 - 88.

[6] Vinther F P, Eiland F, Lind A M, *et al*. Microbial biomass and number of denitrifiers related to macropore channels in agricultural and forest soils. Soil Biology & Biochemistry, 1999, 31: 630 - 611.

[7] Zhou S L, Zhang F, Wang X R. Studies on the spatio-temporal variations of soil $NO_3$-N and apparent budget of soil nitrgen Ⅱ. Winter wheat. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21 (1): 1782 - 1789.

[8] Wu S J, Han X L, Li S Z. The Influence of the Soil Structure, Water Content and Plant Root on soil Energy Appearance. Journal of Northeast Forestry University, 2003, 31 (6): 24 - 26.

[9] Chang C, Janzen H H, Cho C M, *et al*. Nitrous oxide emission through plant. Soil Sci Soc Am J, 1998, 62: 35 - 38.

[20] Huang G H, Chen G X, Han B. Relationship between soil water content and $N_2O$ production. China Journal of Applied Ecology, 1999, 10 (): 53 - 56.

[21] Han J G, Li Z B, *et al*. Characteristics of $N_2O$ emissions from farmland responding to water and temperature. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35 (6): 289 - 289.

[22] Bai H Y, Han J G, Zhang Y P. Mechanism of $N_2O$ emission relying on humidity and temperature form soil. Journal of Agro-Environment Science, 2003, 22 (6): 724 - 726.

[23] Xu W B, *et al*. Effect of temperature on $N_2O$ emissions from sub-tropical upland soil. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39 (): 1 - 8.

[24] Yan X Y, Shi S L. $N_2O$ emission from paddy soil as affected by water regime. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37 (4): 482 - 489.

[25] Liang D L, Tong Y A, Ove Emteryd, *et al*. Effects of available carbon and nitrogen concentration on the $N_2O$ flux of the Loessal soil. J. of Northwest Sci-tech Univ. of Agri and For, 2003, 31 (): 43 - 48.

[26] Liang D L, Tong Y A, Ove Emteryd, *et al*. *In situ* measurement of $N_2O$ emissions form profile of loess soil. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39 (6): 802 - 809.

**参考文献:**


[5] 杨兰芳,蔡祖明. 施氮和玉米生长对土壤氧化亚氮排放的影响,应用生态学报,2005,16(1):100~104.

[6] 华珞,Vinten A J A,郊海金,等. 不同有机物料对土壤 $N_2O$ 排放的影响与调控,中国环境科学,2004,24(4):464~468.

[7] 李勇先,田光明. 不同水分管理模式下水稻土氮素形态转化与 $N_2O$ 释放的关系,生态环境,2003,12(2):157~159.

[8] 杨兰芳,蔡祖聪. 施氮和玉米生长对土壤氧化亚氮排放的影响,应用生态学报,2005,16(1):100~104.

[9] 江长胜,王跃思,郑循华,等. 耕作制度对川中丘陵区冬灌田 $CH_4$ 和 $N_2O$ 排放的影响. 环境科学,2006,27(2):208~213

[0] 邹国元,张福锁. 根际反硝化作用与 $N_2O$ 释放,中国农业大学学报,2002,7(1):77~82.

[1] 史刚荣. 植物根系分泌物的生态效应. 生态学杂志,2004,23(1):97~101.

[2] 王大力,尹澄清. 植物根孔在土壤生态系统中的功能. 生态学报,2000,20(6):869~874.

[3] 白红英,张一平. 西北地区旱田耕层土壤 $N_2O$ 排放特征的研究. 农业环境科学学报,2003,22(5):561~564.

[5] 白红英,耿增超,张一平. 旱耕人为土 $N_2O$ 排放动力学特征及其影响因素. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2003,30(2):82~88.

[7] 周顺利,张福锁,王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈亏研Ⅱ. 冬小麦. 生态学报,2001,21(11):1782~1789.

[8] 吴淑杰,韩喜林,李淑珍. 土壤结构、水分与植物根系对土壤能量状态的影响. 东北林业大学学报,2003,31(6):24~26.

[0] 黄国宏,陈冠雄,韩冰. 土壤含水量与 $N_2O$ 产生途径研究. 应用生态学报,1999,10(1):53~56.

[1] 韩建刚,李占斌,朱咏莉,等. 农田土壤中 $N_2O$ 释放的水温特征研究,土壤通报,2004,35(6):284~289.

[2] 白红英,韩建刚,张一平. 农田温室气体 $N_2O$ 释放的水热效应机理初探. 农业环境科学学报,2003,22(6):724~726.

[3] 徐文彬,刘维屏,刘广深. 温度对旱田土壤 $N_2O$ 的影响影响研究,土壤学报,2000,39(1):1~8.

[4] 颜晓元,施书莲,杜丽娟,等. 水分状况对水田土壤 $N_2O$ 排放的影响,土壤学报,2000,37(4):499~515.

[5] 梁东丽,同延安,Ove Emteryd,等. 有效碳源和有效氮源对黄土土壤 $N_2O$ 逸出量的影响. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2003,31(1):43~48.

[6] 梁东丽,同延安,Ove Emteryd,等. 黄土性土壤剖面中 $N_2O$ 排放的研究初报. 土壤学报,2002,39(6):802~809.