

# 滇池流域集约化菜田 NO 与 NO<sub>2</sub> 排放的研究

卢昌艾<sup>1</sup>, 胡万里<sup>2\*</sup>, 孔令明<sup>2</sup>, 夏体渊<sup>2</sup>, 段宗颜<sup>2</sup>

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 农业部植物营养与养分循环重点实验室 北京 100081;

2 云南省农业科学院农业环境资源研究所 云南昆明 650205)

**摘要:**采用密闭通气气室法,在滇池流域旱季和雨季开展了2个生长周期内集约化西芹地 NO/NO<sub>2</sub> 排放研究。结果表明,NO/NO<sub>2</sub> 排放速率的日变化规律受温度的影响较为明显,中午时段最高,凌晨时段最低。西芹生育期间,CK处理(裸地)的 NO/NO<sub>2</sub> 排放速率维持在一定水平,中后期 NF处理(不施氮)NO/NO<sub>2</sub> 排放速率有所升高;LF(N 450 kg/hm<sup>2</sup>)和 HF(N 1200 kg/hm<sup>2</sup>)处理受西芹的生长和频繁氮肥追施的影响,生育期 NO/NO<sub>2</sub> 排放速率逐渐升高。旱季与雨季 CK处理 NO/NO<sub>2</sub> 排放量分别为 1.30 和 NO<sub>x</sub>-N 1.51 kg/hm<sup>2</sup>,NF处理分别较 CK高出 NO<sub>x</sub>-N 1.0 和 1.44 kg/hm<sup>2</sup>。LF处理旱季与雨季 NO/NO<sub>2</sub> 排放量分别为 NO<sub>x</sub>-N 4.88 和 5.67 kg/hm<sup>2</sup>,其损失率分别为 0.79% 和 0.92%;HF处理旱季和雨季 NO/NO<sub>2</sub> 排放量分别为 NO<sub>x</sub>-N 7.58 和 10.19 kg/hm<sup>2</sup>,其损失率分别为 0.63% 和 0.85%,说明氮肥用量较高时,土壤-作物系统的 NO<sub>x</sub>-N 损失量也较高,但其损失率并不随施氮量的升高而升高。

**关键词:**滇池流域;集约化菜田;NO 与 NO<sub>2</sub> 排放速率;NO<sub>x</sub>-N 损失率

中图分类号:S143.1

文献标识码:A

文章编号:1008-505X(2008)05-0900-07

## NO and NO<sub>2</sub> emissions from intensive vegetable field of Dianchi watershed

LU Chang-ai<sup>1</sup>, HU Wan-li<sup>2\*</sup>, KONG Ling-ming<sup>2</sup>, XIA Ti-yuan<sup>2</sup>, DUAN Zong-yan<sup>2</sup>

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Key Laboratory of Plant Nutrition and Nutrient Cycling, CAAS, Beijing 100081, China;

2 Institute of Agricultural Environment and Resource, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China)

**Abstract:** Enclosure growth chamber method, which removes the air inlet NO/NO<sub>2</sub> first and then monitors NO/NO<sub>2</sub> flux of enclosed growth chamber, was used to collect and determine in situ NO/NO<sub>2</sub> emission from intensive vegetable field in Dianchi watershed in both dry and rainy seasons. The following results were obtained: 1) The NO/NO<sub>2</sub> flux varied diurnally along with the soil temperature, its maximum appeared at noon, and its minimum appeared before dawn; 2) In the celery growth stage, the NO/NO<sub>2</sub> flux of CK treatment (bare land) maintained at a certain level; the NO/NO<sub>2</sub> flux of NF treatment (N 0 kg/ha) was higher than CK treatment in the mid and late period of celery growth; the NO/NO<sub>2</sub> fluxes of LF (N 450 kg/ha) and HF (N 1200 kg/ha) treatments increased gradually because of the celery's growth and frequent N fertilizer application; 3) In dry and rainy seasons, the NO/NO<sub>2</sub> emission of CK treatment in the growth stage was NO<sub>x</sub>-N 1.30 and 1.51 kg/ha, respectively, and the NO/NO<sub>2</sub> emission of NF treatment in the growth stage was NO<sub>x</sub>-N 1.07 and 1.44 kg/ha higher than that of CK, respectively; 4) In dry and rainy seasons, the NO/NO<sub>2</sub> emission of LF treatment in the growth stage were NO<sub>x</sub>-N 4.88 and 5.67 kg/ha, which accounted for about 0.79% and 0.92% of applied fertilizer N, respectively; the NO/NO<sub>2</sub> emission of HF treatment in the growth stage was NO<sub>x</sub>-N 7.58 and 10.19 kg/ha, which accounted for about 0.63% and 0.85% of applied fertilizer N, respectively. The NO/NO<sub>2</sub>-N emission in the growth stage increased with nitrogen fertilizer application rate, but its loss rate does not increase accordingly.

**Key words:** Dianchi watershed; intensive vegetable field; NO and NO<sub>2</sub> flux; NO<sub>x</sub>-N loss rate

收稿日期:2007-09-18

接受日期:2008-01-15

基金项目:国家“十五”攻关课题(2001BA610A-04)资助。

作者简介:卢昌艾(1968—)男,安徽庐江人,博士,主要从事土壤生态环境与生态过程的研究。E-mail:calu@caas.ac.cn

\* 通讯作者 Tel:0871-5891779, E-mail:h0282@sina.com

我国农田氮素的气态损失量约占氮肥用量的 30%~70% ,氮氧化物 (NO<sub>x</sub>) 排放是农田氮素气态损失的主要形式之一<sup>[1]</sup>。农田 NO 与 NO<sub>2</sub> 大多数来自于土壤中的微生物过程 ,是土壤微生物硝化与反硝化过程的一种中间产物<sup>[2-3]</sup>。谢旻等<sup>[4]</sup>采用国外模型 ,估算 2000 年我国土壤 NO 与 NO<sub>2</sub> 的年排放总量为 N 22.58 × 10<sup>4</sup> 吨 ;Yienger 和 Levy<sup>[5]</sup>估算出中国和日本的 NO 与 NO<sub>2</sub> 年排放量达到 N 31 × 10<sup>4</sup> 吨。我国农田 NO 与 NO<sub>2</sub> 排放速率的研究并不多见 ,菜地的研究更少 ,而菜地的土壤养分条件及高施氮量特别适合土壤的硝化反硝化作用。Fang 等<sup>[6]</sup>采用化学荧光 NO - NO<sub>2</sub> - NO<sub>x</sub> 分析仪研究得出 ,大白菜和马铃薯地的 NO-N 损失率占氮素用量的 0.6%~3.6% ;郑循华等<sup>[7]</sup>研究了华东冬小麦田的 NO 排放 ,结果表明温度是决定 NO 排放速率季节变化的首要因素 ,施氮肥不能改变 NO 排放速率的季节变化规律 ;曾清如等<sup>[8]</sup>和周细红等<sup>[9]</sup>采用封闭式箱法模拟研究了温室箱中施用尿素后的 NO<sub>2</sub> 浓度变化趋势。目前大多数研究者认为 ,土壤排放的 NO<sub>x</sub> 是 NO ,但是也有观测表明土壤还排放比较可观的 NO<sub>2</sub><sup>[2]</sup>。Stohf<sup>[10]</sup>在模型估算土壤氮氧化物排放时 ,认为氮氧化物中 NO-N 与 NO<sub>2</sub>-N 的比例为 9:1。但 NO 在大气中能与臭氧很快地反应形成 NO<sub>2</sub> ,有必要

同时监测 NO 和 NO<sub>2</sub> 的排放速率。

我国开展 NO 与 NO<sub>2</sub> 的研究较少 ,相关简单测试方法不多见。化学荧光 NO - NO<sub>2</sub> - NO<sub>x</sub> 分析仪较为昂贵 ,且该仪器测试的通用性较差<sup>[11]</sup>。本试验借鉴 NH<sub>3</sub> 挥发及 N<sub>2</sub>O 排放的监测方法 ,采用密闭通气室法 ,同时监测西芹地土壤-植物系统的 NO/NO<sub>2</sub> 排放速率 ,了解不同氮肥用量对西芹地 NO/NO<sub>2</sub> 排放的影响 ,探讨蔬菜生长季节 NO 与 NO<sub>2</sub> 排放的日变化与季节性变化规律 ,为我国集约化农田 NO/NO<sub>2</sub> 排放的估算提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验方法

滇池流域四季如春的气候条件 ,适合蔬菜花卉类作物的生长。近年来 ,该区域蔬菜的种植面积越来越大 ,成为当地农业结构调整的主要发展方向。西芹是该地区一年四季的主栽品种。本研究在西芹两个生长周期(旱季 3 月 2 日至 6 月 10 日 ,雨季 7 月 5 日至 10 月 10 日) ,田间原位监测了土壤-西芹系统的 NO/NO<sub>2</sub> 排放速率。西芹品种为美国 P.S. 公司的百利西芹 ,栽培密度为 75000 株/hm<sup>2</sup>。两块试验地的土壤养分和质地状况见表 1。

表 1 试验地表层 (0—20 cm) 土壤氮、磷养分状况

Table 1 The N and P nutrient status of surface soil (0—20 cm)

季节 Season	有机质 OM (g/kg)	全氮 TN (g/kg)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (mg/kg)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (mg/kg)	速效 P Avail. P (mg/kg)	质地 Texture
旱季 Dried season	30.9	2.12	51.42	124.73	353.27	粘壤土 Clay loam
雨季 Rainy season	29.0	1.73	86.20	52.45	169.66	砂壤土 Sandy loam

田间试验设 4 个处理 :1) 裸地不施肥 (CK) ;2) 西芹不施肥 (NF) ;3) 西芹推荐施肥 (LF) ;4) 西芹习惯施肥 (HF) 。LF 与 HF 的氮肥用量分别为 N 450、1200 kg/hm<sup>2</sup> ,各处理的磷肥、钾肥及微肥用量保持一致。追肥时期与基追比例参考当地施肥习惯 ,氮肥基追比为 1:9 ,4 次追 N 量按照 0.5:1.0:2.0:1.5 比例进行 ,旱季于移栽后 13、30、61(立心期)和 83 d(肥大充实期)追施 ;雨季于播种后 15、36、64、88 d 追施 ,基施氮肥为复合肥 (N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O 为 15%:15%:15%) ,追施氮肥为尿素。其他田间管理措施按照当地习惯进行。重复 2 次 ,随机排列 ,小区面积 9 m × 1.8 m。西芹旱季移栽种植 ,雨季点播种植。

### 1.2 样品采集与测定方法

NO/NO<sub>2</sub> 气体的采集与测定 :空气中 NO 流经三氧化铬-石英砂氧化管 ,CrO<sub>3</sub> 氧化管对气流中 NO 的氧化效率达到 99% ;NO<sub>2</sub> 很容易被 25% 三乙醇胺吸收<sup>[12]</sup> ,生成 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> (如式 1)。



除去进气口的 NO/NO<sub>2</sub> 气体 ,用盐酸萘乙二胺比色法测定出气口端三乙醇胺吸收液的 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 浓度 (如式 2) ,就可计算出一定时间内土壤-植物系统的 NO/NO<sub>2</sub> 排放速率<sup>[13-14]</sup>。每小区同时收集气体样品 1 个。具体方法如下 :

NO/NO<sub>2</sub> 测定采用密闭通气气室法<sup>[15]</sup>。密闭室

是长×宽×高为 60 cm×60 cm×100 cm 的透明有机玻璃箱,真空泵抽取 NO/NO<sub>2</sub> 气体。下部用铝板制作带槽的底座,埋入土壤 10 cm,测定时将有机玻璃箱放在底座上,用水密封底座与有机玻璃箱<sup>[16]</sup>。每次采集好样品后,将有机玻璃箱移开,以避免长时间的罩盖对作物生长的影响。进气口的空气首先通过三氧化铬-石英砂氧化管,将 NO 转化为 NO<sub>2</sub>,再通过装有 25% 三乙醇胺的洗气瓶,以除去进气中的 NO/NO<sub>2</sub>,经过下部的进气口进入生长室,更换有机玻璃箱内的气体,由上部的出气口流出。出气口的 NO 经三氧化铬氧化后,由流量计控制(流量 5 L/min 左右)进入装有 25% 三乙醇胺溶液的试管,避光采样,吸收空气从生长室带出的 NO<sub>2</sub><sup>[8-9,13-14]</sup>。

西芹生长季节,样品采集频率约 10 d 采 1 次,每次采样于上午 9:30~10:00 点进行(试验前 3 次日变化模拟结果表明,该时段的 NO/NO<sub>2</sub> 排放速率接近日平均排放速率)。为避免空气潮湿影响三氧化铬-石英砂的氧化效果,采样持续时间 0.5 h。日变化每 4 h 测定 1 次,一天采集 6 次。样品采用盐酸萘乙二胺比色法测定<sup>[13-14]</sup>。取 10 mL 于容量瓶中,

加入 1 mL 磷酸溶液,摇匀,5 min 后加入 0.2 mL 盐酸萘乙二胺溶液,用去离子水稀释到刻度,摇匀后 10 min 在 540 nm 波长处光度法测定提取液中的 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>。

土壤含水量、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、10 cm 处土壤温度等采用常规分析方法<sup>[17]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 NO/NO<sub>2</sub> 排放的日变化规律

在西芹旱季与雨季的 2 个生长周期中,每个生育期测定了 3 次西芹地 NO/NO<sub>2</sub> 排放速率的日变化。图 1 看出,旱季 4 月 26 日与雨季 8 月 15 日 4 个处理的 NO/NO<sub>2</sub> 排放速率日变化规律基本一致,同一处理西芹地 NO/NO<sub>2</sub> 日排放速率较高的时段均出现在中午时段(13:30~14:00),HF 处理的达到 NO<sub>x</sub>-N 520~860 μg/(m<sup>2</sup>·h),LF 处理的达到 NO<sub>x</sub>-N 325~376 μg/(m<sup>2</sup>·h);凌晨时段(5:30~6:00)的较低,HF 处理的为 NO<sub>x</sub>-N 269~374 μg/(m<sup>2</sup>·h),LF 处理的为 NO<sub>x</sub>-N 147~232 μg/(m<sup>2</sup>·h)。

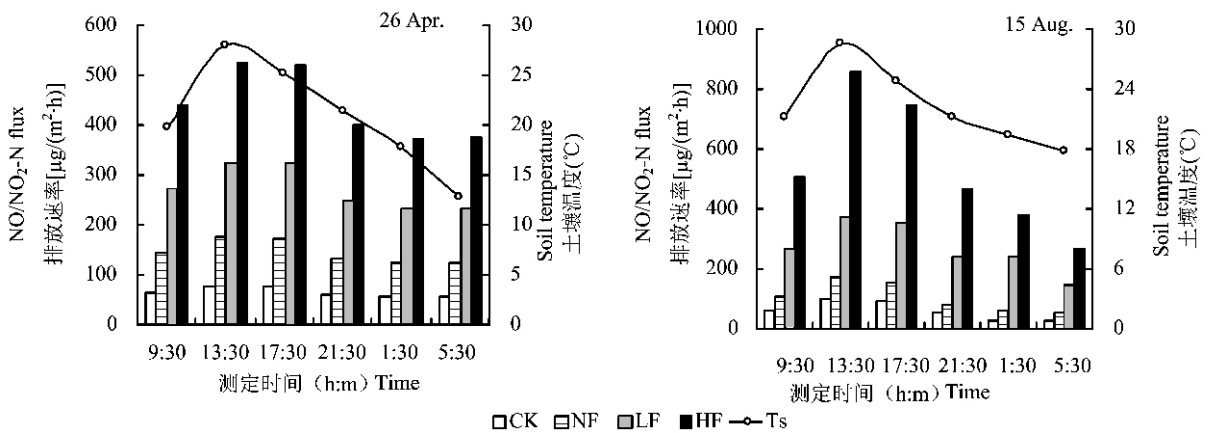


图 1 西芹地 NO/NO<sub>2</sub> 排放速率的日变化规律

Fig. 1 Diurnal variation of NO/NO<sub>2</sub> flux of celery field (Left on Apr. 26th, Right on Aug. 15th)

测定 NO/NO<sub>2</sub> 排放速率日变化时,都是在浇水或施肥几天后进行,一天时间内影响土壤硝化反硝化作用的土壤速效氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)含量、土壤含水量与 pH 值 3 种主要影响因子<sup>[18]</sup>差异不大,但土壤温度差异较大。从 2 次日变化试验结果可以看出,不同处理土壤-作物系统的 NO/NO<sub>2</sub> 排放速率受土壤温度的影响较为明显。试验中午时段(13:30~14:00)土壤温度达到 24.0~27.5℃,是土壤硝化和反硝化作用最为适宜的温度<sup>[18]</sup>;凌晨时段(5:

30~6:00)土壤温度为 11~13℃,低于土壤硝化反硝化作用的最适温度,NO/NO<sub>2</sub> 排放速率相对较低。

### 2.2 NO/NO<sub>2</sub> 排放随生长季节性的变化规律

2.2.1 西芹生育期 NO/NO<sub>2</sub> 排放随生长季节性的变化规律 CK 处理的 NO/NO<sub>2</sub> 排放速率除播种后,有一个小的排放高峰外,整个生育期变化不大,旱季平均排放速率为 NO<sub>x</sub>-N 63.0 μg/(m<sup>2</sup>·h),雨季平均排放速率为 NO<sub>x</sub>-N 65.4 μg/(m<sup>2</sup>·h)(图 2)。这个小的排放高峰,可能是由于土壤的“干湿效应”引起的。

西芹播种前,土壤经过了 7~10 d 的翻晒,待整平、浇水、种植西芹后,因土壤的“干湿效应”过程中,土壤反硝化与硝化作用强烈<sup>[19]</sup>,造成 CK 处理早期 NO/NO<sub>2</sub> 排放速率较高。

种植西芹的 NF、LF 和 HF 处理,NO/NO<sub>2</sub> 排放速率均呈现出前期低,中后期(约 1 个月后)NO/NO<sub>2</sub> 排放速率逐渐升高的趋势。但是不施肥 NF 处理在 NO/NO<sub>2</sub> 排放速率达到一定值时,呈现上下波动的趋势;旱季 LF 和 HF 处理 NO/NO<sub>2</sub> 排放速率有逐步增加的趋势,雨季 LF 和 HF 处理的 NO/NO<sub>2</sub> 排放速

率在种植约 40 天后(8 月中旬),其增加趋势就不太明显。(图 2)。

旱季生长前期温度低时氮肥用量小,生长后期温度高时用量大,生长季节性 NO<sub>x</sub>-N 排放速率呈现前期低、后期高的变化规律,与土壤温度、氮肥用量的变化趋势相一致;雨季生长前期温度高时氮肥用量小,中后期(8 月中旬)温度低时用量大,但是该时期土壤温度介于 12.3~18.9℃,仍然是土壤硝化反硝化作用较为强烈的时期,中后期生长季节性 NO<sub>x</sub>-N 排放速率仍然维持在较高水平。

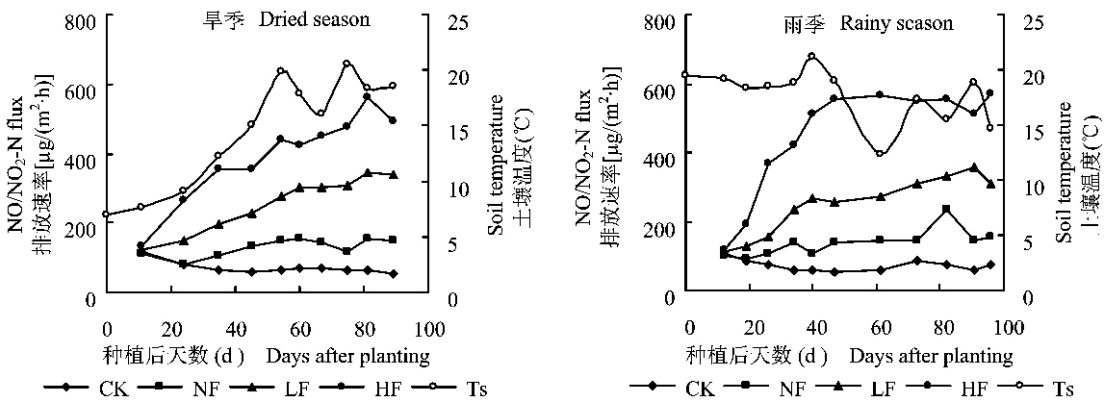


图 2 西芹地 NO/NO<sub>2</sub> 排放速率随生长季节性的变化规律

Fig. 2 Seasonal variation of NO/NO<sub>2</sub> flux of celery field

(旱季氮肥在移栽后 13、30、61 和 83 d;雨季在播种后 15、36、64 和 88 d 追施。

Topdressing of N fertilizer: dried season at 13, 30, 61 and 83 days after transplanting; rainy season at 15, 36, 64 and 88 days after planting)

2.2.2 种植作物与施肥对 NO/NO<sub>2</sub> 排放速率的影响 从 NF、LF 和 HF 三个处理西芹地的 NO/NO<sub>2</sub> 排放速率来看,氮肥用量影响了西芹地的 NO/NO<sub>2</sub> 排放速率,尤其是中后期氮肥追施较为集中,使得 LF 和 HF 处理的 NO/NO<sub>2</sub> 排放速率维持在较高的水平上。西芹移栽期或苗期,为避免速效氮肥(如尿素、碳铵等)对移栽苗或出苗的影响,氮素肥料用量少,甚至不施,前期施肥主要是施用磷钾含量高的复合肥,其溶解作用很慢;中后期西芹追肥 4 次,分别相当于西芹整个生育期施氮量的 9%、18%、36%、27%,氮肥用量大,且施用较为集中。在中后期大部分时段内,土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量为 HF > LF > NF, NF 处理在某些时候的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 或 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量低于 CK 处理,这可能是西芹吸收所致(图 3)。因此,中后期的氮肥追施,使得土壤的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 或 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量较大,是造成 HF 和 LF 处理西芹地中后期 NO/NO<sub>2</sub> 排放速率升高的主要原因。

### 2.3 西芹地的 NO/NO<sub>2</sub> 排放量及损失率

采用累计加权法计算作物生长季节西芹地的 NO/NO<sub>2</sub> 排放量,其等于单位时间的 NO/NO<sub>2</sub> 排放速率 × 该排放速率代表的生育期天数,计算结果见表 2。表 2 看出,CK 处理在旱季(95 d)和雨季(99 d)的 NO/NO<sub>2</sub> 排放量为 NO<sub>x</sub>-N 1.30 和 1.51 kg/hm<sup>2</sup>; NF 处理排放量为 NO<sub>x</sub>-N 2.37 和 2.9 kg/hm<sup>2</sup>。

LF 处理在旱季和雨季的 NO/NO<sub>2</sub> 排放量为 NO<sub>x</sub>-N 4.88 和 5.67 kg/hm<sup>2</sup>,分别占施氮量(损失率)的 1.08% 和 1.26%,如果扣除裸地土壤的 NO/NO<sub>2</sub> 排放量,LF 处理在旱季和雨季的 NO/NO<sub>2</sub> 损失率分别为 0.79% 和 0.92%;HF 处理施氮量很高,在旱季和雨季的 NO/NO<sub>2</sub> 排放量为 NO<sub>x</sub>-N 7.58 和 10.19 kg/hm<sup>2</sup>,损失率分别为 0.63% 和 0.85%,其 NO/NO<sub>2</sub> 损失率低于 LF 处理,说明氮肥施用量较高(N 1200 kg/hm<sup>2</sup>)时,土壤-作物系统的 NO/NO<sub>2</sub>-N 损失量也较高,但是 NO/NO<sub>2</sub>-N 损失率并不随施氮量的升高而

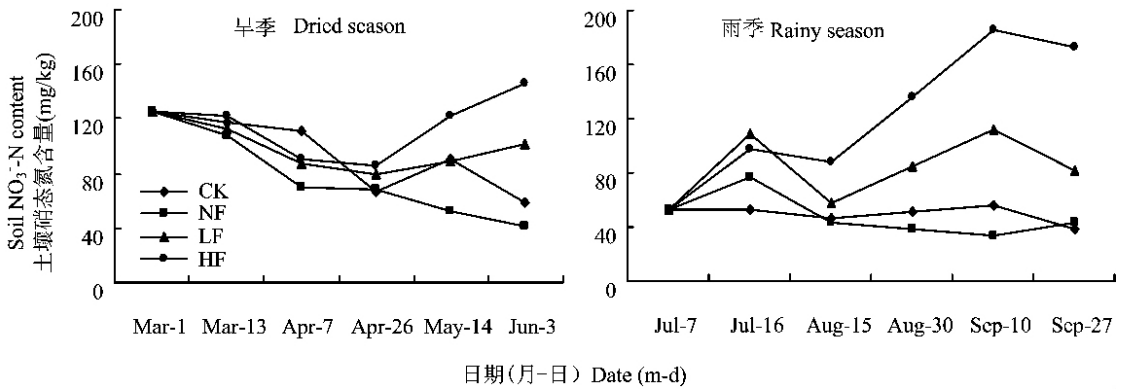


图 3 西芹地 0—20 cm 表层土壤硝态氮含量

Fig.3 0—20 cm surface soil nitrate content of celery field

表 2 不同处理西芹地的 NO/NO<sub>2</sub>-N 排放量

Table 2 NO/NO<sub>2</sub>-N emission of celery field in Dianchi watershed

处理 Treatment	NO <sub>x</sub> -N 排放速率 NO <sub>x</sub> -N flux [ μg/( m <sup>2</sup> ·h )]		旱季 Dried season		雨季 Rainy season	
	旱季 Dried season	雨季 Rainy season	排放量 Emission ( NO <sub>x</sub> -N kg/hm <sup>2</sup> )	肥料 N 损失率 N Loss ( % )	排放量 Emission ( NO <sub>x</sub> -N kg/hm <sup>2</sup> )	肥料 N 损失率 N Loss ( % )
	CK	57.2 a	63.6 a	1.30 a	—	1.51 a
NF	104.0 b	124.3 b	2.37 b	—	2.95 b	—
LF	214.0 c	238.4 c	4.88 c	1.08	5.67 c	1.26
HF	332.6 d	428.9 d	7.58 d	0.63	10.19 d	0.85

注 (Note): 不同字母表示差异达 5% 显著水平 Different letters mean significant at 5% level.

升高,其原因有待于进一步研究。

### 3 讨论

#### 3.1 种植西芹与施用氮肥对西芹菜地生态系统 NO/NO<sub>2</sub> 排放的影响

本试验表明,不同处理间的 NO<sub>x</sub>-N 排放速率和生育期 NO<sub>x</sub>-N 排放量差异显著,说明种植作物的 NF 处理较 CK 显著增加了 NO<sub>x</sub>-N 排放速率。NF 处理与 CK 处理中后期 NO/NO<sub>2</sub> 排放速率的差异,可能是中后期西芹根系分泌物为根际微生物提供营养和能源。Kuikman 等<sup>[20]</sup>研究认为,微生物偏嗜于利用根系分泌物的有机碳,而对土壤中原有有机质的分解作用降低。因此,种植西芹的处理,在中后期根系分泌物增加,根际微生物活性的提高和数量的增加促进了土壤硝化作用和反硝化作用<sup>[19]</sup>,增加了土壤 NO/NO<sub>2</sub> 的排放。

氮肥施用增加了 NO<sub>x</sub>-N 的排放,施肥的 LF 与 HF 处理在西芹生长季节的 NO<sub>x</sub>-N 排放量较 NF 处理分别增加了 0.92~1.06 倍与 2.20~2.45 倍,结果

与郑循华<sup>[7]</sup>的试验趋势相一致,但增加幅度较华东冬小麦田试验的有所降低。华东冬小麦田试验生长季施肥量为 N 191 kg/hm<sup>2</sup> 时,当季氮肥施用使 NO 排放量较 CK 增加了 5~7 倍。造成两个试验不施肥处理 NO<sub>x</sub>-N 排放量差异的主要原因是生育期的土壤温度有明显差异,本试验生育期的土壤平均温度为 15.5~17.6℃,NF 处理生育期的 NO/NO<sub>2</sub> 排放量达到 NO<sub>x</sub>-N 2.37~2.95 kg/hm<sup>2</sup>;而华东冬小麦的温度约为 10℃,CK 处理生育期(11 月 1 日至翌年 5 月 27 日)的 NO 排放量仅为 NO<sub>x</sub>-N 0.69 kg/hm<sup>2</sup>。

Fang 等<sup>[6]</sup>在浙江双桥农场监测了大白菜地和马铃薯地的 NO 排放速率分别为 NO<sub>x</sub>-N 41.4 和 123.1 μg/( m<sup>2</sup>·h ),低于本研究 LF 和 HF 处理的 NO/NO<sub>2</sub> 排放速率。造成上述差异的原因有:1)Fang 等只测定了蔬菜地的 NO 排放速率,而没有测定 NO<sub>2</sub> 的排放速率;2)其试验土壤速效氮偏低、肥料用量较少,其土壤的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量分别仅为 4.29、12.1 mg/kg,大白菜仅施用了 300 kg/hm<sup>2</sup> 复合肥(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O 为 15%:15%:15%),马铃薯地施用

了 220 kg/hm<sup>2</sup> 复合肥(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O 为 15%:15%:15%) 和 5.73 吨/hm<sup>2</sup> 堆肥, 复合肥在土壤中溶解慢, 有时甚至一个生育期也溶解得很少, 而本试验追施用氮肥为尿素; 3 监测方法的不同也可能是造成上述差异的原因之一。本研究可能高估了土壤-西芹系统 NO/NO<sub>2</sub> 的排放通量, 因为该密闭通气室法输入的是除去 NO<sub>x</sub> 后的空气, 输出的是土壤净排放的 NO<sub>x</sub>, 这样人为拉大了大气与地表之间的 NO<sub>x</sub> 浓度梯度。

### 3.2 旱季和雨季西芹地 NO/NO<sub>2</sub> 排放量的差异

尽管试验年份雨季的降雨量相对较多, 雨季为 268.6 mm, 旱季为 177.7 mm, 但旱季与雨季大棚均有遮盖, 雨水难以进入大棚, 土壤含水量主要来自于灌溉, 农民会根据土壤墒情决定何时灌溉, 通常情况下每 7 d 灌溉 1 次, 因而旱季与雨季西芹生育期的土壤含水量差异并不大。造成雨季西芹地 NO/NO<sub>2</sub> 排放量较旱季稍高可能是雨季的土壤温度较旱季的高, 旱季土壤平均温度为 15.5℃, 雨季为 17.6℃, 该结论与华东冬小麦田的 NO 排放速率主要受土壤温度的影响结论相一致<sup>[7]</sup>。

### 参 考 文 献:

- [1] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992. 164-166.  
Zhu Z L, Wen Q X. Nitrogen in soils of China[M]. Nanjing: Jiangsu Sciences and Technology Publishing House, 1992. 164-166.
- [2] Yamulki S, Harrison R M, Goulding K W T, Webster C P. N<sub>2</sub>O, NO and NO<sub>2</sub> fluxes from a grassland: Effect of soil pH[J]. Soil Biol. Biochem., 1997, 29(8): 1199-1208.
- [3] Watta S A, Wagner-Riddle C, Edwards G, Vet R J. Evaluating a flux-gradient approach for flux and deposition velocity of nitrogen dioxide over short-grass surfaces[J]. Atmos. Environ., 2004, 38: 2619-2626.
- [4] 谢旻, 王体健, 张美根, 杨修群. 土壤氮氧化物排放及其对中国地区对流层光化学特性影响的数值模拟研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(6): 948-956.  
Xie M, Wang T J, Zhang M G, Yang X Q. Modeling of NO<sub>x</sub> emissions from soil and their effect on tropospheric photochemistry in China[J]. Acta Pedol. Sin., 2005, 42(6): 948-956.
- [5] Yienger J J, Levy H. Empirical model of global soil biogenic NO<sub>x</sub> emission[J]. J. Geophys. Res., 1995, 100(D6): 11447-11464.
- [6] Fang S X, Mu Y J. Air/surface exchange of nitric oxide between two typical vegetable lands and the atmosphere in the Yangtze Delta, China[J]. Atmos. Environ., 2006, 40: 6329-6337.
- [7] 郑循华, 王明星, 王跃思. 华东稻麦轮作生态系统冬小麦田 NO 排放观测研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 577-581.  
Zheng X H, Wang M X, Wang Y S. NO emission from winter wheat fields of rice and wheat rotation ecosystem in southeast China[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2000, 11(4): 577-581.
- [8] 曾清如, 沈杰, 周细红, 等. 施用尿素对温室内 NO<sub>2</sub> 和 NH<sub>3</sub> 气体积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5): 857-860.  
Zeng Q R, Shen J, Zhou X H et al. Effects of applied urea on accumulation of NO<sub>2</sub> and NH<sub>3</sub> in atmosphere of greenhouse[J]. J. Agro-Environ. Sci., 2004, 23(5): 857-860.
- [9] 周细红, 曾清如, 蒋朝辉, 汤灿. 尿素施用对土壤 pH 值和模拟温室箱内 NH<sub>3</sub> 和 NO<sub>2</sub> 浓度的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 374-376.  
Zhou X H, Zeng Q R, Jiang Z H, Tang C. Effects of urea on soil pH and the accumulation of NH<sub>3</sub> and NO<sub>2</sub> in a simulative greenhouse[J]. Chin. J. Soil Sci., 2004, 35(3): 374-376.
- [10] Stohl A, Williams E, Wotawa G et al. A European inventory of soil nitric oxide emissions and the effect of these emissions on the photochemical formation of ozone[J]. Atmos. Environ., 1996, 30: 3741-3755.
- [11] 彭慧敏, 吴名剑, 任凤莲, 等. 离子色谱法测定卷烟主流烟气中的氮氧化物[J]. 分析化学, 2007, 35(2): 289-292.  
Peng H M, Wu M J, Ren F L et al. Determination of nitrogen oxides in cigarette mainstream smoke by ion chromatography[J]. Chin. J. Anal. Chem., 2007, 35(2): 289-292.
- [12] 李密, 张新祥. TEA 法测定 NO<sub>2</sub> 的反应机理研究[J]. 高等学校化学学报, 1999, 20(12): 1940-1944.  
Li M, Zhang X X. Reaction mechanism of NO<sub>2</sub> determination by the TEA[J]. Chem. Res. in Chin. Univ., 1999, 20(12): 1940-1944.
- [13] 城乡建设环境保护部环境保护局. 环境监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1983. 206-208.  
Bureau of Urban and Rural Construction and Environmental Protection. Environmental monitoring & analyzing techniques[M]. Beijing, China Environ-Science Press, 1983. 206-208.
- [14] 陈乐怡, 佟玉芹. 被动采样法测定环境空气中的二氧化氮[J]. 环境化学, 1994, 13(5): 460-465.  
Chen L Y, Dong Y Q. Determination of nitrogen dioxide from ambient air by passive sampling[J]. Environ. Chem., 1994, 13(5): 460-465.
- [15] 王旭刚, 郝明德, 陈磊, 张少民. 长期施肥条件下小麦农田氨挥发损失的原位研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 18-24.  
Wang X G, Hao M D, Chen L, Zhang S M. In situ study of ammonia volatilization from wheat cropland under long-term continuous fertilization[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2006, 12(1): 18-24.
- [16] 于克伟, 黄斌. 田间大豆植株 N<sub>2</sub>O 通量的测定及光强的影响[J]. 应用生态学报, 1997, 8(2): 171-176.  
Yu K W, Huang B. Field measurement of N<sub>2</sub>O flux from soybean and effect of light on it[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 1997, 8(2): 171-176.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1998. 125-133.  
Lu R K. Analytical techniques of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science-Technology Press, 1998. 125-133.

- [18] 范晓晖, 朱兆良. 旱地土壤中的硝化-反硝化作用[J]. 土壤通报, 2002, 33(5): 385-391.  
Fan X H, Zhu Z L. Nitrification and denitrification in upland soils [J]. Chin. J. Soil Sci., 2002, 33(5): 385-391.
- [19] 熊明彪, 何建平, 宋光煜. 根分泌物对根际微生物生态分布的影响[J]. 土壤通报, 2002, 33(2): 145-148.  
Xiong M B, He J P, Song G Y. Effect of root exudations on ecological distribution of rhizospheric microorganisms [J]. Chin. J. Soil Sci., 2002, 33(2): 145-148.
- [20] Kuikman P J, Jansen A G, Van Veen J A. <sup>15</sup>N-nitrogen mineralization from bacteria by protozan grazing at different soil moisture regimes [J]. Soil Biol. Biochem., 1991, 32(2): 193-200.