

# 不同施氮水平对‘库尔勒香梨’园土壤 N<sub>2</sub>O 排放的影响

王成<sup>1</sup>, 陈波浪<sup>1,2</sup>, 玉素甫江·玉素音<sup>1,2</sup>, 王前登<sup>1</sup>, 柴仲平<sup>1,2\*</sup>, 刘雪艳<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>新疆农业大学草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052; <sup>2</sup>新疆土壤与植物生态过程实验室, 乌鲁木齐 830052)

**摘要:**【目的】探寻不同施氮处理对香梨园土壤 N<sub>2</sub>O 排放的影响。【方法】在香梨年生育期内, 采用静态箱-气相色谱法对 6 a 树龄的‘库尔勒香梨’园进行定位监测。设置 5 个施氮水平: 不施肥(N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>K<sub>0</sub>)、不施氮肥(N<sub>0</sub>PK)、低氮量 150 kg·hm<sup>-2</sup>(N<sub>1</sub>PK)、中氮量 300 kg·hm<sup>-2</sup>(N<sub>2</sub>PK)、和高氮量 450 kg·hm<sup>-2</sup>(N<sub>3</sub>PK)。【结果】不同施氮处理 N<sub>2</sub>O 排放通量在一天不同时段表现为夜间(20:00—8:00) < 上午(8:00—12:00) < 中午(12:00—16:00) < 下午(16:00—20:00); N<sub>2</sub>O 排放日累积量表现为: 夜间 < 白天。不同施氮处理(N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>K<sub>0</sub>、N<sub>0</sub>PK、N<sub>1</sub>PK、N<sub>2</sub>PK、N<sub>3</sub>PK) 年生育期土壤 N<sub>2</sub>O 累积量分别为 341.616、346.548、437.000、459.748、531.960 g·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。施氮量在 450 kg·hm<sup>-2</sup> 时, N<sub>2</sub>O 排放通量(下午)、日累积量、年生育期累积量均显著大于其他各处理。温度、灌水、施用氮肥均能影响土壤 N<sub>2</sub>O 的排放, 其中施用氮肥对土壤 N<sub>2</sub>O 的排放影响最大, 土壤 N<sub>2</sub>O 的排放量随着施氮量的增加而增加。施氮量为 150、300 和 450 kg·hm<sup>-2</sup> 时, N<sub>2</sub>O 排放系数分别为 0.060%、0.038% 和 0.041%。【结论】随着氮肥(尿素)施用量的增加, N<sub>2</sub>O 排放系数先减小再增大, 在尿素施用量为 300 kg·hm<sup>-2</sup>(纯 N) 时, 土壤 N<sub>2</sub>O 排放系数最小(0.038%)。

**关键词:** ‘库尔勒香梨’; 氮肥; 氧化亚氮; 累积量; 排放系数

中图分类号: S661.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-9980(2018)11-1353-10

## Effects of different nitrogen application levels on nitrous oxide emission from the soil of a ‘Kuerlexiangli’ pear orchard

WANG Cheng<sup>1</sup>, CHEN Bolang<sup>1,2</sup>, Yusufujang Yusuyn<sup>1,2</sup>, WANG Qiandeng<sup>1</sup>, CHAI Zhongping<sup>1,2\*</sup>, LIU Xueyan<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>College of Pratacultural and Environmental Science, Xinjiang Agriculture University, Urumqi 830052, Xinjiang, China; <sup>2</sup>Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Process, Urumqi 830052, Xinjiang, China)

**Abstract:** 【Objective】 ‘Kuerlexiangli’ pear is a characteristic fruit industry in Xinjiang, where there is a large scale production. However, nitrogen content in the soils is low in ‘Kuerlexiangli’ pear orchards. Through the application of nitrogen fertilizer, soil nitrogen contents can be increased to meet the nitrogen demands of pear trees. In order to increase the yield of ‘Kuerlexiangli’ pear, farmers often use large amounts of fertilizer, which are excessive for the demands of pear trees. Excessive fertilization leads nitrogen enrichment in the soil, and reduces nitrogen use efficiency. The surplus nitrogen in the soil will be converted into ammonia and nitrogen oxides, which will re-enter the atmosphere, causing air pollution, intensifying greenhouse effect, and leading to a series of ecological and environmental problems. Therefore, we studied the effects of different nitrogen treatments on soil N<sub>2</sub>O emissions with in-situ field monitoring and indoor analysis, and determined the appropriate amount of nitrogen for pear orchard soil. 【Methods】 We conducted fertilization experiments with different amount of nitrogen fertilizer in a 6-year-old ‘Kuerlexiangli’ pear orchard. Five nitrogen treatments were applied: no

收稿日期: 2018-05-18 接受日期: 2018-08-02

基金项目: 国家自然科学基金(31460548); 自治区自然科学基金面上项目(2017D01A38); 自治区青年科技创新人才培养工程(QN2016YX0670); 土壤学新疆维吾尔自治区重点学科资助项目

作者简介: 王成, 男, 在读硕士研究生, 研究方向: 果树营养与施肥。Tel: 15099661350, E-mail: 2628715074@qq.com

\*通信作者 Author for correspondence. Tel: 13565912598, E-mail: chaizhongpingth@sina.com

fertilizer ( $N_0P_0K_0$ ), no nitrogen fertilizer ( $N_0PK$ ), low nitrogen amount  $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  ( $N_1PK$ ), medium nitrogen amount  $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  ( $N_2PK$ ) and high nitrogen amount  $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  ( $N_3PK$ ). During the growth period of pear trees (from April to September), the  $N_2O$  emissions from the soil in the pear orchard were collected and monitored by applying the static box-gas chromatography method. 【Results】In different nitrogen treatments,  $N_2O$  emission flux was lowest at night (20:00—8:00), followed in an increasing order by that in morning (8:00—12:00), at noon (12:00—16:00) and in the afternoon (16:00—20:00), and the range of change was from  $0.060$  to  $0.310 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ . In April and June, the  $N_2O$  fluxes of soils treated with nitrogen ( $N_1PK$ ,  $N_2PK$  and  $N_3PK$ ) were significantly higher than those in other months (May, July, August and September). On the 15th of May, July, August and September, the  $N_2O$  fluxes under different fertilization treatments increased slightly compared to the soil  $N_2O$  flux on the 5th and 25th of the corresponding months. At nighttime (except April 5 and June 5), soil  $N_2O$  fluxes was not significantly different between soils treated with nitrogen fertilizer and that with no nitrogen fertilizer. It varied from  $0.060$  to  $0.150 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ . At the daytime (from April to July),  $N_2O$  flux of soil treated with nitrogen was significantly greater than that with no nitrogen fertilization, and the difference in the afternoon on April 5 was especially prominent. It ranged from  $0.0120$  to  $0.310 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ . The  $N_2O$  flux among different treatments was in the order of  $N_1PK < N_2PK < N_3PK$ . The daily accumulation of soil  $N_2O$  emissions was lower in the nighttime than in the daytime. The  $N_2O$  emission from soils treated with nitrogen showed a fluctuating upward and downward trend at nighttime, but it decreased gradually in the control group. There was no significant difference in the daily soil  $N_2O$  emission among different fertilization treatments, and the range was from  $0.720$  to  $1.800 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ . The  $N_2O$  emission of soil treated with nitrogen showed a fluctuating upward and downward trend at daytime, but the  $N_2O$  emission in the control soil decreased gradually. The daily  $N_2O$  emission in the soil treated with nitrogen was significantly greater than in the control. It ranged from  $0.900$  to  $3.160 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  in nitrogen treatments but varied from  $0.840$  to  $1.352 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  in the control. The daily  $N_2O$  emission in the soils treated with nitrogen was in the order of  $N_1PK < N_2PK < N_3PK$ . The  $N_2O$  emission during the annual growth period among different treatments was in the order of  $N_0P_0K_0 < N_0PK < N_1PK < N_2PK < N_3PK$ , and was  $341.616$ ,  $346.548$ ,  $437.000$ ,  $459.748$  and  $531.960 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , respectively. It increased with the increase in nitrogen application rate. The  $N_2O$  emission in  $N_1PK$ ,  $N_2PK$ , and  $N_3PK$  treatments increased by  $26.10\%$ ,  $32.67\%$ , and  $53.50\%$  compared with  $N_0PK$  treatment, respectively. When nitrogen application rate was  $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , the  $N_2O$  flux in the afternoon, diurnal cumulative amount and the cumulative amount during annual growth period were significantly greater than the other treatments. Temperature, irrigation and application of nitrogen fertilizer could all affect  $N_2O$  emission from the soil. The application of nitrogen fertilizer had the greatest impact on  $N_2O$  emission, which increased with the nitrogen application rate. When nitrogen application rate was  $150$ ,  $300$ , and  $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , the  $N_2O$  emission coefficients was  $0.060\%$ ,  $0.038\%$  and  $0.041\%$ , respectively. 【Conclusion】based on the comprehensive effects of nitrogen application on the production and environmental benefits, it was recommended to apply nitrogen at a dose of  $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  in pear orchard. However, the nitrous oxide emission of soil in pear orchard is affected by many factors such as temperature, nitrogen application amount, irrigation, etc., and there are interactive effects between these factors. Therefore, the isotopic tracer technology should be used to study the action mechanism of nitrogen fertilizer on soil  $N_2O$  emission in future.

**Key words:** ‘Kuerlexiangli’ pear; Nitrogen fertilizer; Nitrous oxide; Accumulation; Emission

N<sub>2</sub>O是大气中产生温室效应的主要气体之一,对温室效应的贡献率达到6%<sup>[1]</sup>。如今大气中N<sub>2</sub>O的体积分数为 $3.12 \times 10^{-4} \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ ,且每年以0.2%~0.3%的速率增加,到2050年其体积分数将增至 $3.5 \times 10^{-4} \sim 4.0 \times 10^{-4} \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[2-3]</sup>。大气中N<sub>2</sub>O的增加主要是人类活动的结果,其中人类农业生产活动排放N<sub>2</sub>O的量占人类活动排放N<sub>2</sub>O总量的84%<sup>[4]</sup>。土壤是大气中N<sub>2</sub>O的主要来源,特别是农田土壤,对大气中N<sub>2</sub>O的贡献率为70%<sup>[5-6]</sup>。土壤中N<sub>2</sub>O的产生途径主要来自于微生物作用下的硝化、反硝化以及化学反硝化作用<sup>[7]</sup>。而影响这些途径的是自然因素(温度、水分、土壤pH和土壤通气性等)和人为因素(施肥量、肥料种类和耕作制度等)<sup>[8-10]</sup>。随着人口的日益增长,人类对粮食的需求量越来越大,为了提高粮食产量,氮肥往往被过量施入农田,而氮肥的过量施入为硝化和反硝化作用提供了充足的底物——矿质氮,导致N<sub>2</sub>O大量排放<sup>[11]</sup>。特别是当施氮量大于作物最大生长需求量时,N<sub>2</sub>O的排放量会随着施氮量的增加呈指数形式增长<sup>[12]</sup>。因此,确定科学合理的施氮量对减少N<sub>2</sub>O的排放有着重大意义。

近年来,我国对农田N<sub>2</sub>O排放的研究主要集中在稻田<sup>[13]</sup>、麦田<sup>[14]</sup>及玉米田<sup>[15]</sup>等,而对果园土壤N<sub>2</sub>O排放的研究则相对较少。‘库尔勒香梨’作为新疆特色林果业,有着显著的规模及效益优势<sup>[16]</sup>。2016年,巴音郭楞蒙古自治州梨的种植面积已达到40 175 hm<sup>2</sup>,总产量为428 288 t,已经发展成为南疆农业的重要支柱产业之一<sup>[17]</sup>。笔者以新疆库尔勒市6 a树龄的香梨园为对象,在不同施氮处理基础上,原位研究在不同施肥处理下氮肥对土壤N<sub>2</sub>O排放通量及累积量的影响,探索香梨年生育期内土壤的N<sub>2</sub>O排放规律,以期确定香梨园适宜施氮量,提高氮素利用率及降低果园环境风险提供科学的理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验区概况

试验地位于新疆库尔勒市境内恰尔巴格乡和什巴格村5队(41°48'21"N、86°04'22"E,海拔918.7 m),属于典型的暖温带大陆性干旱气候。年降雨量50~55 mm,年最大蒸发量为2 788 mm。年均气温10.5~11.8℃,年均日照时数2 762.1~3 168 h,年均积温4 278℃(≥10℃),年均相对湿度45.0%~50.3%,干燥度39.6~63.3,无霜期175~225 d。供试

土壤为黄潮土,肥力中等。土壤有机质含量( $w_{后}$ )21.56 g·kg<sup>-1</sup>,碱解氮含量46.22 mg·kg<sup>-1</sup>,有效磷含量14.41 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾含量169 mg·kg<sup>-1</sup>,pH 7.9。

### 1.2 试验设计

以6 a树龄的‘库尔勒香梨’为供试样本,嫁接砧木为杜梨(*Pyrus betulifolia* Bge.)。选用树形相近,生长健壮的‘库尔勒香梨’进行挂牌处理,株行距为5 m×6 m。在‘库尔勒香梨’整个年生育期(4—9月)内,进行不同氮肥处理的施肥试验。设置以下5个处理:不施肥(N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>K<sub>0</sub>)、不施氮(N<sub>0</sub>PK)、低氮量(N<sub>1</sub>PK)、中氮量(N<sub>2</sub>PK)和高氮量(N<sub>3</sub>PK)。每个处理各选取6株香梨树,3次重复,随机排列,试验区面积为2 400 m<sup>2</sup>。氮肥为尿素(含N 46%),磷、钾肥为重过磷酸钙(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 46%)和硫酸钾(含K<sub>2</sub>O 51%) (表1)。在香梨树萌芽前(4月1日),各处理氮肥的

表1 不同氮肥施用量的试验方案

Table 1 The experiment scheme with different amounts of nitrogen fertilizer

处理 Treatment	养分用量 Amount of nutrient applied/(kg·hm <sup>2</sup> )		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	0	0	0
N <sub>0</sub> PK	0	300	60
N <sub>1</sub> PK	150	300	60
N <sub>2</sub> PK	300	300	60
N <sub>3</sub> PK	450	300	60

60%(N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>K<sub>0</sub>和N<sub>0</sub>PK除外)和磷、钾肥(N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>K<sub>0</sub>除外)全部施入。在果实膨果期前(6月1日),剩余氮肥的40%进行追施。施肥方式采用沟施,灌溉采用漫灌。分别在4—8月的10日进行灌水,每次灌水量3 000 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,共计5次。其他田间管理与当地常规管理相同。

### 1.3 样品收集与测定

采用静态箱法在4—9月每月5日、15日和25日的上午(8:00—12:00)、中午(12:00—16:00)、下午(16:00—20:00)和夜间(20:00—8:00),对土壤N<sub>2</sub>O进行收集。采集装置呈圆柱状,内径260 mm,高400 mm,材料为聚氯乙烯硬质塑料桶。桶内装有一个空气搅拌风扇,桶顶部装有1个气体样品采集口(图1)。每个样点设置3个采集装置。采样时将采集桶放在底座边缘的凹槽中,加水密封,以防底座与采集箱结合处漏气。每隔15、30、45、60 min使用带

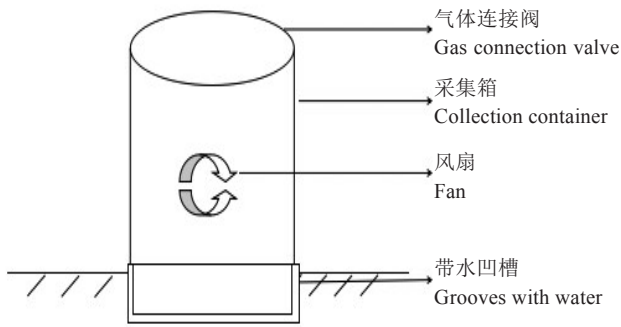


图 1 ‘库尔勒香梨’园土壤氧化亚氮采集示意图  
Fig. 1 The schematic diagram of soil  $N_2O$  collection  
in ‘Kuerlexiangli’ pear orchard

有气体链接阀的 50 mL 注射器采集气体样品并迅速转移至真空铝箔采气袋中,带回实验室进行气相色谱分析。在采集气体的同时,用水银温度计记录桶内空气温度。

用气相色谱仪 (Agilent7890A, Agilent, Palo Alto, USA) 对  $N_2O$  的进行测定。测定条件是载气为  $N_2$ , 流量为  $30 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ , 检测器 (ECD) 温度为  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , 分离柱温度为  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ 。对测定的气样浓度进行线性回归分析,得到气体排放速率,求出氧化亚氮的排放通量。

#### 1.4 数据处理

$N_2O$  排放通量计算公式为:

$$F = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{273}{273 + T}$$

式中:  $F$  为  $N_2O$  排放通量 ( $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $\rho$  为标准状态下  $N_2O$  的密度 ( $1.98 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $V$  为密闭箱内有效空间体积 ( $\text{m}^3$ );  $A$  为密闭箱覆盖的地面面积 ( $\text{m}^2$ );  $\Delta c/\Delta t$  为在特定时间内的氧化亚氮浓度变化速率;  $T$  为采样时密闭箱的温度 ( $^\circ\text{C}$ )<sup>[18]</sup>。

$N_2O$  排放系数 (EF) (%) = (施氮处理  $N_2O$  累积量 - 不施氮处理  $N_2O$  累积量) / 施氮量  $\times 100$

采用 Microsoft Excel 2010 和 DPS v6.50 进行数据分析, OriginPro 2017 进行图表制作。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施氮处理对 $N_2O$ 排放通量的影响

由图 2 可知,不同施肥处理的土壤  $N_2O$  排放通量从夜间 (20:00—8:00) 至下午 (16:00—20:00) 变化规律一致,均呈逐渐增大的趋势,变化为  $0.060 \sim 0.310 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。每个处理在下午的土壤  $N_2O$  排放

通量均明显大于夜间的土壤  $N_2O$  排放通量。因为夜间至下午,温度不断升高,增加了硝化和反硝化细菌的活性,导致  $N_2O$  排放增加。在 4 月和 6 月,施氮处理 ( $N_1\text{PK}$ 、 $N_2\text{PK}$  和  $N_3\text{PK}$ ) 的土壤  $N_2O$  排放通量均明显大于其他月份 (5、7、8、9 月),不施氮处理 ( $N_0\text{PK}_0$  和  $N_0\text{PK}$ ) 的土壤  $N_2O$  排放通量则无明显变化,说明施氮能促进土壤  $N_2O$  排放。主要是由于在 4 月 1 日和 6 月 1 日,对梨园进行了施基肥和施追肥,增施氮肥为土壤中微生物硝化、反硝化以及化学反硝化反应提供了充足的先决条件,促进了土壤  $N_2O$  的排放,从而使  $N_2O$  排放通量增加。在 5、7、8、9 月的每月 15 号,不同施肥处理下土壤  $N_2O$  排放通量均略高于当月的 5 号和 25 号的土壤  $N_2O$  排放通量。是因为 4~8 月每月 10 号对梨园进行灌水,增加了土壤含水量,使硝化及反硝化细菌活性增强,促进了土壤  $N_2O$  的生成。

在 4—7 月的白天 (8:00—20:00),不同施肥处理间的土壤  $N_2O$  排放通量有明显差异,施氮处理的土壤  $N_2O$  排放通量明显大于不施氮处理,尤其在 4 月 5 号的下午差异最明显,变化为  $0.012 \sim 0.310 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。而在夜间 (4 月 5 日和 6 月 5 日除外),不施氮处理和施氮处理的土壤  $N_2O$  排放通量无明显差异,变化为  $0.060 \sim 0.150 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。白天,  $N_3\text{PK}$  处理的土壤  $N_2O$  排放通量明显高于其他施氮处理 (8 月和 9 月除外),  $N_2\text{PK}$  处理的土壤  $N_2O$  排放通量略高于  $N_1\text{PK}$  处理,但差异不明显。施氮处理的土壤  $N_2O$  排放通量表现为:  $N_1\text{PK} < N_2\text{PK} < N_3\text{PK}$ 。表明施用氮肥能促进土壤  $N_2O$  排放,  $N_2O$  排放通量随着施氮量的增加而增加。但随着香梨生育期的推进,距离基肥和追肥日期越来越远,各处理土壤中的氮素大部分已被树体吸收或以其他气体形式挥发,  $N_2O$  排放通量受施肥的影响也逐渐减少,到成熟期的 8—9 月,不同施肥处理的土壤  $N_2O$  排放通量已无明显差异。

### 2.2 不同施氮处理对土壤 $N_2O$ 排放日累积量的影响

由图 3 可知,随着生育期的推进,在夜间,施氮处理的土壤  $N_2O$  日累积量呈现波动式上升和下降趋势,不施氮处理的土壤  $N_2O$  日累积量呈逐渐降低的趋势,不同施肥处理的土壤  $N_2O$  日累积量差异不明显,变化为  $0.720 \sim 1.800 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。施氮处理波动上升的主要原因是在 4 月 1 日和 6 月 1 日分别对试验地



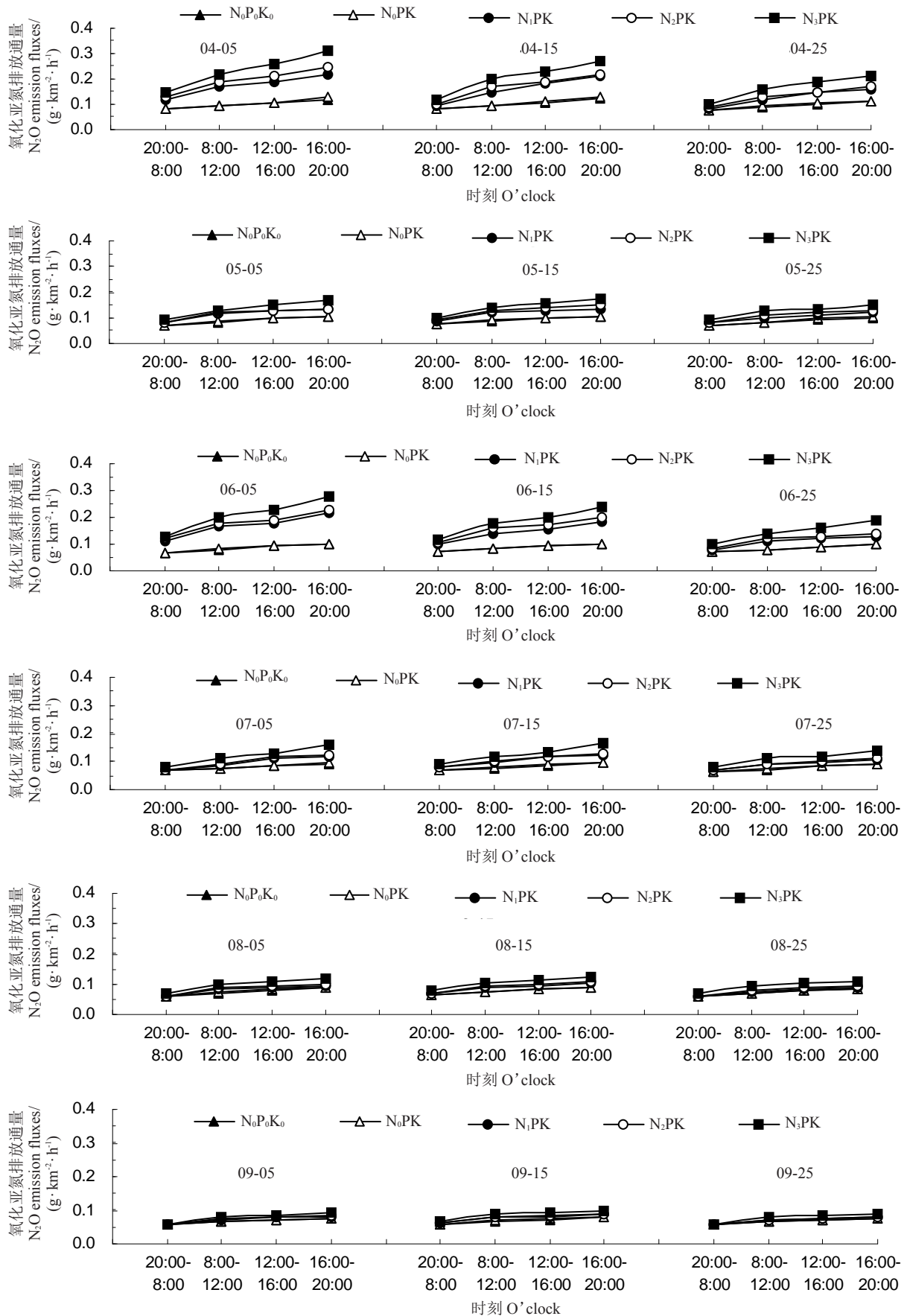
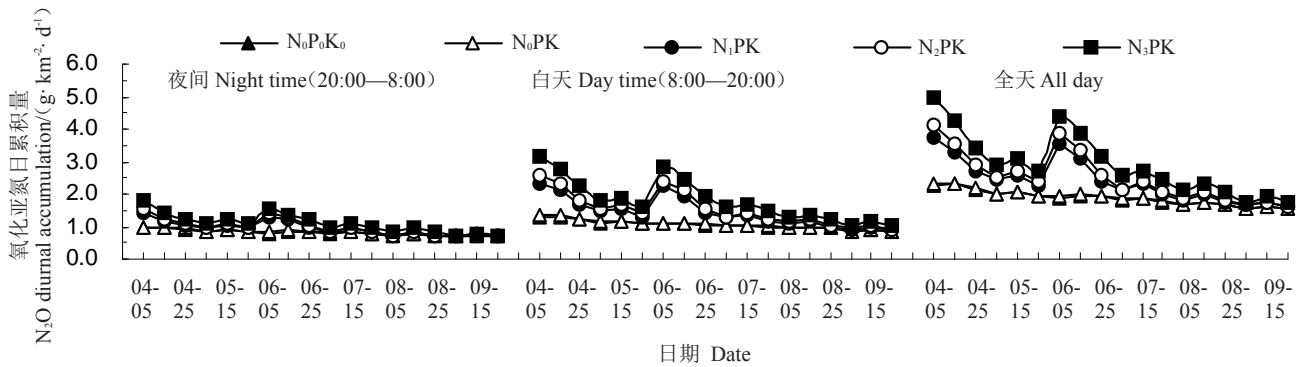


图 2 不同施氮处理的土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量

Fig. 2 Soil N<sub>2</sub>O emission flux in treatments with different nitrogen application amounts

图 3 不同施氮处理的土壤  $N_2O$  排放日累积量Fig. 3 Diurnal accumulation of soil  $N_2O$  emission among different nitrogen application treatments

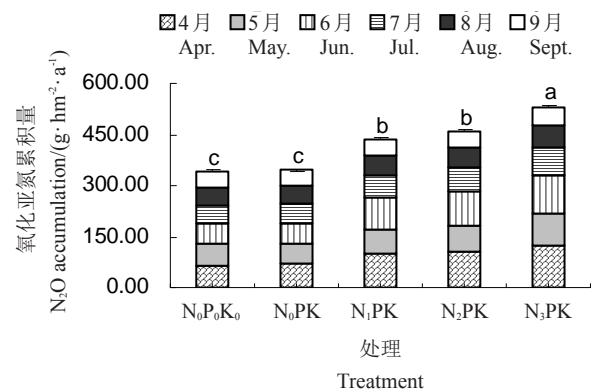
进行施基肥和施追肥,并在4—8月每月10日对香梨园进行了灌水,施氮肥和灌水能促进土壤 $N_2O$ 的排放,增加 $N_2O$ 日累积量。在白天,施氮处理的土壤 $N_2O$ 日累积量呈现波动式上升和下降趋势,变化为 $0.900\sim 3.160\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。不施氮处理的土壤 $N_2O$ 日累积量呈逐渐降低的趋势,变化为 $0.840\sim 1.352\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。施氮处理和不施氮处理的土壤 $N_2O$ 日累积量有明显差异,施氮处理土壤 $N_2O$ 日累积量明显大于不施氮处理土壤 $N_2O$ 日累积量。波动上升的主要原因与夜间相同。白天施氮处理间的土壤 $N_2O$ 日累积量有明显差异,不施氮处理间则差异不明显。施氮处理间土壤 $N_2O$ 日累积量表现为: $N_1PK < N_2PK < N_3PK$ 。年生育期内,在白天各处理 $N_2O$ 排放日累积量均大于夜间 $N_2O$ 排放日累积量,是由于白天气温高于夜间气温,温度的升高增加了硝化和反硝化微生物以及酶的活性,提高硝化和反硝化反应速率,增加了 $N_2O$ 排放日累积量。

全天(当日20:00—次日20:00)不同施肥处理的土壤 $N_2O$ 日累积量在香梨年生育期整体变化趋势与白天相同。不同施肥处理间的土壤 $N_2O$ 日累积量表现为(9月25日除外): $N_0P_0K_0 < N_0PK < N_1PK < N_2PK < N_3PK$ ,变化为 $1.560\sim 4.960\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。施氮处理和不施氮处理的土壤 $N_2O$ 日累积量存在明显差异,施氮处理土壤 $N_2O$ 日累积量明显大于不施氮处理土壤 $N_2O$ 日累积量。 $N_3PK$ 处理明显高于其他各处理, $N_1PK$ 和 $N_2PK$ 处理间差异不明显。在4月5日, $N_1PK$ 、 $N_2PK$ 、 $N_3PK$ 处理均达到峰值( $3.760$ 、 $4.160$ 、 $4.960\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ),在6月5日,出现次峰值( $3.560$ 、 $3.840$ 、 $4.400\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ )。是由于4月1日和6月1日对试验地进行施基肥和施追肥所引起。由于基施氮肥用量大于追施氮肥用量,因此在4月5

日的日累积峰值均大于6月5日的日累积峰值。各施氮处理的土壤 $N_2O$ 日累积量,在5、7、8、9月的15日相比于5日和25日略有增加。是由于4—8月的每月10日试验区进行了灌水,适宜的土壤水分条件和干湿交替过程使土壤 $N_2O$ 排放日累积量增加。在香梨成熟末期的9月,香梨园内有少量落果及枯枝落叶,对土壤产生了一定的保温效果,并增加了表层土壤的碳氮含量,有利于有机质矿化,增加微生物的活性,促进 $N_2O$ 少量排放,使其日累积量有所增加。

### 2.3 不同施氮处理对年生育期 $N_2O$ 排放累积量及排放系数的影响

由图4可知,在‘库尔勒香梨’年生育期内,施氮处理 $N_2O$ 排放累积量和不施氮处理年生育期 $N_2O$ 排放累积量相比差异显著,施氮处理年生育期 $N_2O$ 排放累积量显著大于不施氮处理年生育期 $N_2O$ 排放累积量。 $N_1PK$ 、 $N_2PK$ 、 $N_3PK$ 处理的年生育期 $N_2O$ 排放累积量分别比 $N_0PK$ 处理增加了26.10%、32.67%、53.50%。 $N_3PK$ 处理的年生育期 $N_2O$ 排放累积量显

图 4 不同施氮处理的年生育期土壤  $N_2O$  排放累积量  
Fig. 4 Accumulation soil  $N_2O$  emission during annual growth cycle in different nitrogen application treatments

著大于其他各处理,而N<sub>1</sub>PK和N<sub>2</sub>PK处理间、N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>K<sub>0</sub>和N<sub>0</sub>PK处理间差异不显著。不同施肥处理的年生育期N<sub>2</sub>O排放累积量随着施氮量的增加而增加,施氮是影响N<sub>2</sub>O排放年生育期累积量的重要因素,施氮能增加‘库尔勒香梨’园土壤N<sub>2</sub>O排放年生育期的累积量,通过N<sub>2</sub>O排放累积量与施氮量的相关性分析,它们之间呈显著正相关,相关系数为0.978( $p < 0.05$ )。

由表2可知,N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>K<sub>0</sub>、N<sub>0</sub>PK、N<sub>1</sub>PK、N<sub>2</sub>PK、N<sub>3</sub>PK处理的年生育期N<sub>2</sub>O排放累积量分别为341.616、346.548、437.000、459.748、531.960 g·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,大小关系表现为N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>K<sub>0</sub><N<sub>0</sub>PK<N<sub>1</sub>PK<N<sub>2</sub>PK<N<sub>3</sub>PK。施氮量在150~450 kg·hm<sup>-2</sup>时,N<sub>2</sub>O排放系数为0.038%~0.060%。在香梨年生育周期内,N<sub>2</sub>O排放系数随着施氮量的增加呈现出先减小后增大的趋势,在施氮量为300 kg·hm<sup>-2</sup>时,‘库尔勒香梨’

表2 不同施氮处理的土壤N<sub>2</sub>O排放系数

Table 2 Soil N<sub>2</sub>O emission indexes in different nitrogen application treatments

处理 Treatment	施氮量 Nitrogen application rate/(kg·hm <sup>-2</sup> )	N <sub>2</sub> O年生育期排放累积量 N <sub>2</sub> O emission accumulation in annual growth cycle/ (g·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	N <sub>2</sub> O排放系数 N <sub>2</sub> O emission factors/%
N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	0	341.616 ± 3.27 c	/
N <sub>0</sub> PK	0	346.548 ± 3.15 c	/
N <sub>1</sub> PK	150	437.000 ± 4.02 b	0.060
N <sub>2</sub> PK	300	459.748 ± 3.76 b	0.038
N <sub>3</sub> PK	450	531.960 ± 4.08 a	0.041

园土壤N<sub>2</sub>O排放系数最小(0.038%)。

### 3 讨论

#### 3.1 温度对N<sub>2</sub>O排放的影响

温度是影响N<sub>2</sub>O排放的主要因素之一<sup>[19]</sup>。温度的变化能影响土壤硝化及反硝化微生物的活性,改变土壤硝化和反硝化反应速率,进而影响N<sub>2</sub>O排放<sup>[20]</sup>。影响硝化作用微生物活性的温度在5~40℃,高于或低于此温度范围,硝化作用便会受到抑制,硝化作用最适温度在30℃左右。反硝化作用微生物活性的温度在5~75℃,最适温度在30~67℃<sup>[21]</sup>。本试验在采样时,箱内温度在20~40℃,在硝化和反硝化作用适宜温度范围内,有利于土壤中N<sub>2</sub>O排放。本试验研究表明,下午‘库尔勒香梨’园土壤N<sub>2</sub>O排放通量高于其他各时段,在一天各时段表现为:夜间<上午<中午<下午,白天‘库尔勒香梨’园

土壤N<sub>2</sub>O排放通量及累积量均高于夜间N<sub>2</sub>O排放通量及累积量。王立刚等<sup>[22]</sup>测得冬小麦/夏玉米土壤N<sub>2</sub>O排放通量在一天温度较高的15:00左右达到最大值,在夜晚温度较低时段出现最小值,本试验的研究结果与此一致。有研究表明,N<sub>2</sub>O排放日通量变化和季节变化均与温度有一定相关关系<sup>[23-24]</sup>。但也有学者的研究结果与此相反,张丽华等<sup>[25]</sup>发现,在沼泽地,N<sub>2</sub>O的排放和温度没有相关关系。谢军飞等<sup>[26]</sup>在北京旱地也发现,N<sub>2</sub>O排放通量会随着表层土壤温度的升高,从而有一定程度的增加,但无明显的线性关系。因此,温度对N<sub>2</sub>O排放的影响还亟待进一步研究。

#### 3.2 灌水对N<sub>2</sub>O排放的影响

土壤水分含量与土壤硝化和反硝化作用密切相关<sup>[27]</sup>。土壤水分含量能影响土壤氧化还原电位(Eh)、土壤微生物活性、酶活性和土壤通气性等,改变硝化和反硝化作用条件,影响硝化和反硝化反应速度,进而影响N<sub>2</sub>O的产生和扩散<sup>[28-29]</sup>。刘惠等<sup>[30]</sup>认为,影响N<sub>2</sub>O排放的主要因素可能是土壤水分和土壤通气状况,N<sub>2</sub>O的排放与土温、地表温度和气温皆无明显相关关系。郑循华等<sup>[31]</sup>研究发现,土壤湿度一般在97%~100%的田间持水量或84%~86%WFPS(土壤充水孔隙度)时,土壤N<sub>2</sub>O排放量达到最大,低于此湿度范围时,N<sub>2</sub>O排放通量与土壤湿度正相关,反之则为负相关。胡玉琼等<sup>[32]</sup>研究表明,在土壤湿度大于15%和土壤通气性较好的情况下,中午前后N<sub>2</sub>O排放通量出现高峰,夜间温度较低时出现低值。本试验在4—8月的10号对梨园进行灌水,N<sub>2</sub>O排放通量和日累积量在灌水后的5d内逐渐增加,然后逐渐减少,在每月的15号(除施肥的4月和6月外)测得N<sub>2</sub>O排放通量和日累积量都相比每月月初和月末略高。结果表明,土壤含水量的增加和土壤干湿交替过程加快了土壤中氮的矿化速率,为参与硝化和反硝化作用的土壤微生物提供了充足的底物,增加了N<sub>2</sub>O的排放,这与许多学者研究结果类似<sup>[33-34]</sup>。

#### 3.3 施氮对N<sub>2</sub>O排放量和排放系数的影响

向土壤中施入氮肥能增加土壤中硝化和反硝化反应底物NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的浓度,促进硝化和反硝化作用,增加N<sub>2</sub>O的排放<sup>[35]</sup>。本试验研究表明,施用氮肥能提高‘库尔勒香梨’园土壤N<sub>2</sub>O排放通量、日累积量和年生育期累积量,并随着施氮量的增加而增加,这与山楠等<sup>[36]</sup>研究结果一致。Gregorich

等<sup>[37]</sup>研究发现,土壤中 $N_2O$ 的排放与施氮量有明显的线性关系。张中杰等<sup>[38]</sup>研究表明,西南地区紫色土冬小麦 $N_2O$ 排放通量与施氮量水平呈正相关。施氮处理下的 $N_2O$ 排放量明显高于不施氮处理<sup>[39]</sup>,本试验研究也表明,果园土壤施用氮肥(尿素)与土壤 $N_2O$ 排放呈显著正相关,与前人研究结果基本一致。另外本试验在4月和6月对梨园同时进行了灌水和施肥,但在4月和6月的15号测得 $N_2O$ 排放日累积量,并没有因4月和6月10号的灌水而增加。这可能是由于4月和6月对梨园进行施肥,土壤中的氮素盈余过多,使得土壤 $N_2O$ 的排放主要受施氮量的影响。有研究发现土壤湿度和土壤温度虽仍对土壤 $N_2O$ 的排放产生影响,但作用远小于土壤氮素对其的影响,土壤温度和水效应被土壤肥料效应所掩盖,使得相关性并不显著<sup>[40-41]</sup>。

庞军柱等<sup>[42]</sup>在黄土高原测得2 a苹果园的 $N_2O$ 排放系数为0.035%和0.082%。本试验研究结果表明,‘库尔勒香梨’园土壤 $N_2O$ 排放系数为0.038%、0.041%、0.060%,与前人<sup>[42]</sup>研究结果相差不大。徐玉秀等<sup>[43]</sup>发现,随着无机氮肥用量的增加, $N_2O$ 排放系数会不断增大,施用氮肥是影响 $N_2O$ 的排放的主要因素。但Lin等<sup>[44]</sup>研究结果表明,随着施氮量的增加, $N_2O$ 排放系数会减小。但本试验研究结果表明,施氮量在 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, $N_2O$ 排放系数最小为0.038%, $N_2O$ 排放系数并没有随着施氮量的增加而增加,这可能是因为在施氮量较高的情况下,土壤中的氮素会在其他途径损失更多, $N_2O$ 排放系数会随着施氮量的变化而变化。因此,仍需应用同位素示踪技术,对‘库尔勒香梨’园土壤 $N_2O$ 的排放进行进一步研究。

## 4 结 论

‘库尔勒香梨’园土壤 $N_2O$ 有明显的日变化特征。不同施肥处理 $N_2O$ 排放通量在一天各时段表现为:晚上<上午<中午<下午,不同施肥处理 $N_2O$ 排放日累积量在白天和夜间均表现为:夜间<白天,施氮处理 $N_2O$ 排放日累积量表现为: $N_1PK < N_2PK < N_3PK$ 。 $N_3PK$ 处理的土壤 $N_2O$ 排放通量(下午)、日累积量、年生育期累积量均显著大于其他各处理,其最大值为 $0.310 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $4.960 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $531.960 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。不同施肥处理土壤 $N_2O$ 年生育期累积量表现为: $N_0P_0K_0 < N_0PK < N_1PK < N_2PK < N_3PK$ ,土壤

$N_2O$ 年生育期累积量分别为 $341.616$ 、 $346.548$ 、 $437.000$ 、 $459.748$ 、 $531.960 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。温度、灌水、施用氮肥均能影响土壤 $N_2O$ 的排放,其中氮肥(尿素)用量与 $N_2O$ 排放量呈显著正相关关系,增施氮肥能明显增加‘库尔勒香梨’园土壤 $N_2O$ 排放通量、日累积量以及年生育期累积量。施氮量为 $150 \sim 450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, $N_2O$ 排放系数为 $0.038\% \sim 0.060\%$ ,尿素的施用量为 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,‘库尔勒香梨’园土壤 $N_2O$ 排放系数最小为 $0.038\%$ 。

## 参考文献 References:

- [1] LASHOF D A, AHUJA D R. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming[J]. *Nature*, 1990, 344 (6266): 529-531.
- [2] RODHE H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect[J]. *Science*, 1990, 248(4960): 1217-1219.
- [3] 王明星, 张仁健, 郑循华. 温室气体的源与汇[J]. *气候与环境研究*, 2000, 5(1): 75-79.  
WANG Mingxing, ZHANG Renjian, ZHENG Xunhua. Sources and sinks of green house gases[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2000, 5(1): 75-79.
- [4] SMITH P, MARTINO D, CAI Z, GWARY D, JANZEN H, KUMAR P, MCCARL B, OGLE S, O'MARA F, RICE C, SCHOLLES B, SIROTKENKO O, HOWDEN M, MCALLISTER T, PAN G, ROMANENKOV V, SCHNEIDER U, TOWPRAYOON S, WATTENBACH M, SMITH J. Greenhouse gas mitigation in agriculture[J]. *Philosophical Transactions Biological Sciences*, 2008, 363(1492): 789-813.
- [5] MELILLO J M, STEUDLER P A, ABER J D, NEWKIRK K, LUX H, BOWLES F P, CATRICALA C, MAGILL A, AHRENS T, MORRISSEAU S. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system[J]. *Science*, 2002, 298 (5601): 2173-2176.
- [6] BOUWMAN A F. The role of soils and land use in the greenhouse effect[J]. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1989, 37(1): 13-19.
- [7] BOUWMAN A F. Nitrogen oxides and tropical agriculture[J]. *Nature*, 1998, 392(6679): 866-867.
- [8] 张树兰, 杨学云, 吕殿青, 同延安. 温度、水分及不同氮源对土壤硝化作用的影响[J]. *生态学报*, 2002, 22(12): 2147-2153.  
ZHANG Shulan, YANG Xueyun, LÜ Dianqing, TONG Yan'an. Effect of soil moisture, temperature and different nitrogen fertilizers on nitrification[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22 (12): 2147-2153.
- [9] 丁雷. 东北农田土壤和植物 $N_2O$ 排放过程初探[D]. 长春: 吉林农业大学, 2008.  
DING Lei. Preliminary study of processes of nitrous oxide emission from soil & plant in the northeast farmland[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2008.
- [10] 段智源. 不同施肥处理对春玉米 $N_2O$ 排放和综合温室效应的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.  
DUAN Zhiyuan. Effects of different fertilizer treatments on ni-



- trous oxide emission and GHGs from spring maize field[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [11] 梁东丽,同延安, Ove Emteryd, 李生秀, 方日尧, 张树兰. 灌溉和降水对旱地土壤 N<sub>2</sub>O 气态损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, (3): 298-302.
- LIANG Dongli, TONG Yan'an, Ove Emteryd, LI Shengxiu, FANG Riyao, ZHANG Shulan. Effect of irrigation and rainfall on the N<sub>2</sub>O losses in dryland[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2002, 8(3): 298-302.
- [12] HOBEN J P, GEHL R J, MILLAR N, GRACE P R, ROBERTSON G P. Nonlinear nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) response to nitrogen fertilizer in on-farm corn crops of the US Midwest[J]. Global Change Biology, 2011, 17(2): 1140-1152.
- [13] 裴自伟, 陈意超, 李伏生, 黄忠华, 罗维刚. 不同灌水模式和施氮处理下稻田 N<sub>2</sub>O 排放通量及其与硝化-反硝化细菌数量的关系[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(12): 2561-2568.
- PEI Ziwei, CHEN Yichao, LI Fusheng, HUANG Zhonghua, LUO Weigang. The relationship between N<sub>2</sub>O emission flux from paddy fields and nitrifying-denitrifying bacteria under different irrigation methods and nitrogen treatments[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(12): 2561-2568.
- [14] 黄光辉, 张明园, 陈阜, 张海林. 耕作措施对华北地区冬小麦田 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 167-173.
- HUANG Guanghui, ZHANG Mingyuan, CHEN Fu, ZHANG Hailin. Influences of tillage methods on N<sub>2</sub>O emission from winter wheat field in North China Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(2): 167-173.
- [15] 黄国宏, 陈冠雄, 张志明, 吴杰, 黄斌. 玉米田 N<sub>2</sub>O 排放及减排措施研究[J]. 环境科学学报, 1998, 18(4): 344-349.
- HUANG Guohong, CHEN Guanxiong, ZHANG Zhiming, WU Jie, HUANG Bin. N<sub>2</sub>O emission in maize field and its mitigation [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1998, 18(4): 344-349.
- [16] 柴仲平, 王雪梅, 陈波浪, 蒋平安, 盛建东, 刘茂. 库尔勒香梨年生物量及养分累积变化规律[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 656-663.
- CHAI Zhongping, WANG Xuemei, CHEN Bolang, JIANG Ping'an, SHENG Jiandong, LIU Mao. Annual biomass and nutrient accumulation of Korla Fragrant Pear[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(3): 656-663.
- [17] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017: 354-355.
- Xinjiang Uyghur Autonomous Region Statistics Bureau. Xinjiang Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017: 354-355.
- [18] 胡保安, 贾宏涛, 朱新萍, 蒋平安, 杨磊, 胡毅, 王宁宁. 不同水分条件下巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地夏季氧化亚氮日排放特征[J]. 生态环境学报, 2015, 24(5): 811-817.
- HU Bao'an, JIA Hongtao, ZHU Xinping, JIANG Ping'an, YANG Lie, HU Yi, WANG Ningning. Daily characteristics of summer N<sub>2</sub>O emission under different water conditions at Bayinbuluke swan lake alpine wetland[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(5): 811-817.
- [19] 林杉, 冯明磊, 阮雷雷, 胡荣桂, 彭业轩, 肖宏宇, 卢兰. 三峡库区不同土地利用方式下土壤氧化亚氮排放及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1269-1276.
- LIN Shan, FENG Minglei, RUAN Leilei, HU Ronggui, PENG Yexuan, XIAO Hongyu, LU Lan. Soil N<sub>2</sub>O flux and its affecting factors under different land use patterns in Three Gorges Reservoir Area of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6): 1269-1276.
- [20] 张振贤, 华珞, 尹凌霄, 滑丽萍, 高娟. 农田土壤 N<sub>2</sub>O 的发生机制及其主要影响因素[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2005, 26(3): 114-120.
- ZHANG Zhenxian, HUA Luo, YIN Xunxiao, HUA Liping, GAO Juan. Nitrous oxide emission from agricultural soil and some influence factors[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2005, 26(3): 114-120.
- [21] 郑循华, 王明星, 王跃思, 沈壬兴, 张文, 龚晏邦. 温度对农田 N<sub>2</sub>O 产生与排放的影响[J]. 环境科学, 1997, 18(5): 1-5.
- ZHENG Xunhua, WANG Mingxing, WANG Yuesi, SHEN Renxing, ZHANG Wen, GONG Yanbang. Impacts of temperature on N<sub>2</sub>O production and emission[J]. Environmental Science, 1997, 18(5): 1-5.
- [22] 王立刚, 李虎, 邱建军. 黄淮海平原典型农田土壤 N<sub>2</sub>O 的排放特征[J]. 中国农业科学, 2008, 41(4): 1248-1254.
- WANG Ligang, LI Hu, QIU Jianjun. Characterization of emissions of nitrous oxide from soils of typical crop fields in Huang-Huai-Hai Plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(4): 1248-1254.
- [23] 邱炜红, 刘金山, 胡承孝, 孙学成, 谭启玲. 菜地系统土壤氧化亚氮排放的日变化[J]. 华中农业大学学报, 2011, 30(2): 210-213.
- QIU Weihong, LIU Jinshan, HU Chengxiao, SUN Xuecheng, TAN Qiling. Daily change of nitrous oxide emission from vegetable system[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2011, 30(2): 210-213.
- [24] 陈卫卫, 王毅勇, 赵志春, 顾江新. 三江平原春小麦农田生态系统氧化亚氮通量特征[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2777-2782.
- CHEN Weiwei, WANG Yiyong, ZHAO Zhichun, GU Jiangxin. Characteristics of nitrous oxide flux in spring wheat field ecosystem in Sanjiang Plain of Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(12): 2777-2782.
- [25] 张丽华, 宋长春, 王德宣. 沼泽湿地 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 排放对氮输入的响应[J]. 环境科学学报, 2005, 25(8): 1112-1118.
- ZHANG Lihua, SONG Changchun, WANG Dexuan. CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions to the atmosphere upon nitrogen addition in the swamp wetland[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(8): 1112-1118.
- [26] 谢军飞, 李玉娥. 土壤温度对北京旱地农田 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 中国农业气象, 2005, 26(1): 7-10.
- XIE Junfei, LI Yu'e. Effect of soil temperature on N<sub>2</sub>O emission in upland farm of Beijing[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2005, 26(1): 7-10.
- [27] 张玉树, 丁洪, 秦胜金. 农业生态系统中氮素反硝化作用与 N<sub>2</sub>O 排放研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(6): 253-259.
- ZHANG Yushu, DING Hong, QIN Shengjin. Progress in the studies of nitrogen denitrification and N<sub>2</sub>O emission in agro-ecosystem[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(6): 253-259.

- [28] 李海防,夏汉平,熊燕梅,张杏锋. 土壤温室气体产生与排放影响因素研究进展[J]. 生态环境, 2007, 16(6): 1781-1788.  
LI Haifang, XIA Hanping, XIONG Yanmei, ZHANG Xingfeng. Mechanism of greenhouse gases fluxes from soil and its controlling factors: A review[J]. Ecology and Environment, 2007, 16(6): 1781-1788.
- [29] 李香兰,徐华,蔡祖聪. 水分管理影响稻田氧化亚氮排放研究进展[J]. 土壤, 2009, 41(1): 1-7.  
LI Xianglan, XU Hua, CAI Zucong. Effect of water management on nitrous oxide emission from rice paddy field: a review [J]. Soils, 2009, 41(1): 1-7.
- [30] 刘惠,赵平,孙谷畴,林永标,饶兴权,王跃思. 华南丘陵区冬闲稻田二氧化碳、甲烷和氧化亚氮的排放特征[J]. 应用生态学报, 2007, 18(1): 57-62.  
LIU Hui, ZHAO Ping, SUN Guchou, LIN Yongbiao, RAO Xingquan, WANG Yuesi. Characteristics of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from winter fallowed paddy fields in hilly area of South China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(1): 57-62.
- [31] 郑循华,王明星,王跃思,沈壬兴,龚宴邦,骆冬梅,张文,金继生,李老土. 稻麦轮作生态系统中土壤湿度对 N<sub>2</sub>O 产生与排放的影响[J]. 应用生态学报, 1996, 7(3): 273-279.  
ZHENG Xunhua, WANG Mingxing, WANG Yuesi, SHEN Renxing, GONG Yanbang, LUO Dongmei, ZHANG Wen, JIN Jisheng, LI Laotu. Impact of soil humidity on N<sub>2</sub>O production and emission from a rice-wheat rotation ecosystem[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1996, 7(3): 273-279.
- [32] 胡玉琼,王跃思,纪宝明,王明星,杜睿. 内蒙古草原温室气体排放日变化规律研究[J]. 大气科学学报, 2003, 26(1): 29-37.  
HU Yuqiong, WANG Yuesi, JI Baoming, WANG Mingxing, DU Rui. Diurnal variations of greenhouse gas emissions from a Nei Mongol grassland[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2003, 26(1): 29-37.
- [33] 陈哲,陈媛媛,高霁,刘汝亮,杨正礼,张爱平. 不同施肥措施对黄河上游灌区油菜田土壤 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 129-139.  
CHEN Zhe, CHEN Yuanyuan, GAO Ji, LIU Ruliang, YANG Zhengli, ZHANG Aiping. Effects of different fertilization measures on N<sub>2</sub>O emission in oil sunflower field in irrigation area of upper Yellow River[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(1): 129-139.
- [34] FIERER N, SCHIMEL J P. Effects of drying-rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2002, 34(6): 777-787.
- [35] 马二登,马静,徐华,蔡祖聪,八木一行. 追肥时间对小麦拔节-成熟期氧化亚氮排放的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(5): 971-978.  
MA Erdeng, MA Jing, XU Hua, CAI Zucong, YAGI Kazuyuki. Nitrous oxide emissions from wheat field at wheat jointing-maturing stage as affected by timing of topdressing[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(5): 971-978.
- [36] 山楠,赵同科,毕晓庆,安志装,赵雨平,张怀文,杜连凤. 适宜施氮量降低京郊小麦-玉米农田 N<sub>2</sub>O 排放系数增加产量[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 163-170.  
SHAN Nan, ZHAO Tongke, BI Xiaoqing, AN Zhizhuang, ZHAO Liping, ZHANG Huaiwen, DU Lianfeng. Suitable nitrogen application reducing N<sub>2</sub>O emission and improving grain yield in wheat-maize crop rotation system in Beijing suburb[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(22): 163-170.
- [37] GREGORICH E G, ROCHETTE P, VANDENBYGAART A J, ANGERS D A. Greenhouse gas contributions of agricultural soils and potential mitigation practices in Eastern Canada[J]. Soil & Tillage Research, 2005, 83(1): 53-72.
- [38] 张中杰,朱波,项红艳. 氮肥施用对西南地区紫色土冬小麦 N<sub>2</sub>O 释放和反硝化作用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10): 2033-2040.  
ZHANG Zhongjie, ZHU Bo, XIANG Hongyan. Effect of nitrogen fertilizer for wheat on N<sub>2</sub>O emission and denitrification in purple soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(10): 2033-2040.
- [39] 王重阳,郑靖,顾江新,王绍斌,史奕,陈欣. 下辽河平原几种旱作农田 N<sub>2</sub>O 排放通量及相关影响因素的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3): 657-663.  
WANG Chongyang, ZHENG Jing, GU Jiangxin, WANG Shaobin, SHI Yi, CHEN Xin. N<sub>2</sub>O emission flux from several dry crops and impact factors in the lower reaches of LiaoHe plain[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(3): 657-663.
- [40] 张中杰,朱波,江长胜,韩广轩,高美荣. 川中丘陵区旱地小麦生态系统 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 排放特征[J]. 生态学杂志, 2005, 24(2): 131-135.  
ZHANG Zhongjie, ZHU Bo, JIANG Changsheng, HAN Guangxuan, GAO Meirong. CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emission from dry-land wheat ecosystem in hilly area of central Sichuan Basin [J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(2): 131-135.
- [41] 董玉红,欧阳竹,李运生,张磊. 肥料施用及环境因子对农田土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(5): 913-918.  
DONG Yuhong, OUYANG Zhu, LI Yunsheng, ZHANG Lei. Influence of fertilization and environmental factors on CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes from agricultural soil[J]. Journal of Agro-environmental Science, 2005, 24(5): 913-918.
- [42] 庞军柱,王效科,牟玉静,欧阳志云,张红星,逯非,刘文兆. 黄土高原苹果园土壤 N<sub>2</sub>O 排放研究[J]. 环境科学学报, 2010, 30(12): 2518-2525.  
PANG Junzhu, WANG Xiaoke, MU Yujing, OUYANG Zhiyun, ZHANG Hongxing, LU Fei, LIU Wenzhao. Nitrous oxide emissions from apple orchard soil in the semiarid Loess Plateau of China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(12): 2518-2525.
- [43] 徐玉秀,郭李萍,谢立勇,云安萍,李迎春,张璇,赵迅,刁田田. 中国主要旱地农田 N<sub>2</sub>O 背景排放量及排放系数特点[J]. 中国农业科学, 2016, 49(9): 1729-1743.  
XU Yuxiu, GUO Liping, XIE Liyong, YUN Anping, LI Yingchun, ZHANG Xuan, ZHAO Xun, DIAO Tiantian. Characteristics of background emissions and emission factors of N<sub>2</sub>O from Major Upland Fields in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(9): 1729-1743.
- [44] LIN S, IQBAL J, HU R, WU J, ZHAO J, RUAN L, MALGHANI S. Nitrous oxide emissions from rape field as affected by nitrogen fertilizer management: A case study in Central China [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(9): 1775-1779.