

夏玉米农田 N_2O 排放影响因素的模拟分析

王良, 徐旭, 叶桂香, 陈国庆*

(作物生物学国家重点实验室, 山东农业大学农学院, 山东泰安 271018)

摘要: 【目的】全球 46%~52% 的 N_2O 来自农田土壤, 农田土壤 N_2O 排放的研究具有重要的环境和经济意义。量化各影响因素对夏玉米农田 N_2O 排放的影响, 可为合理减少施肥产生的 N_2O 排放提供依据。【方法】于 2012 和 2013 年连续两年进行了夏玉米裂区田间试验。试验主区为作物处理, 副区为氮肥处理 (0、150、300、450 kg/hm^2)。采用暗箱静态法-气相色谱法测定了不同处理 N_2O 的排放通量, 比较了不同温度和降雨量条件下不同处理的 N_2O 排放量, 计算了气温、降雨量、氮肥管理和夏玉米吸收对夏玉米农田 N_2O 排放的影响。【结果】温度及降雨量的变化明显影响 N_2O 的排放。2012 年和 2013 年气温和降雨量对夏玉米生长期 N_2O 总排放量的影响分别为 -0.24 和 -0.07。随着施氮量的增加, 施氮对 N_2O 排放的影响率呈线性增加 ($R^2 = 0.923$), 施氮量 0、150、300 和 450 kg/hm^2 , 对玉米田 N_2O 排放的影响分别为 0、0.38、1.63、3.54。夏玉米生长吸收对 N_2O 排放量的平均影响因子为 -0.33, 年际间差异不显著 ($P = 0.07$)。在苗期、穗期、花期, 夏玉米生长吸收的影响因子分别为 -0.57、-0.29 和 -0.13, 不同生育期的影响因子差异显著 ($P = 0.0015$)。不同施氮量下, 气候条件对夏玉米农田 N_2O 排放影响率差异不显著 ($P > 0.05$); 不同气温和降雨量, 夏玉米生长吸收对 N_2O 排放的影响在同一施氮量下差异不显著 ($P > 0.05$), 且均随施氮量的增加而减小。【结论】通过量化分析, 气候条件对 N_2O 排放的影响与气温和降雨量密切相关, 温度升高影响增大, 反之则减小, 降雨后排放显著增大。施氮对 N_2O 排放的影响随施氮量增加线性增加。夏玉米生长吸收降低了 N_2O 排放, 且在不同生育时期的影响差异显著。综合各影响因子, 低氮量条件下 ($\leq 150 \text{ kg}/\text{hm}^2$), 气候因素和玉米生长对 N_2O 排放的影响较大, 高氮量下 ($\geq 300 \text{ kg}/\text{hm}^2$), 氮肥的施用是影响 N_2O 排放的主要因子。

关键词: 夏玉米农田; 氧化亚氮; 影响因子

中图分类号: S147.2

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2016)02-0346-07

Simulation of the factors influencing N_2O emission in summer corn farmland

WANG Liang, XU Xu, YE Gui-xiang, CHEN Guo-qing*

(State Key Laboratory of Crop Biology/Agronomy College, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract: 【Objectives】Agricultural soils are considered as a major source of N_2O emission contributing approximately 46%–52% of the global anthropogenic N_2O flux. We analyzed the contribution of climate factors, nitrogen (N) fertilizer application rates and the absorption of summer corn on N_2O emission from soil in summer corn field which had great importance to reduce N_2O emissions produced by N fertilizer. 【Methods】Split plot field experiments were conducted in summer corn in 2012 and 2013. The main factor was summer corn and fallow field, the deputy factor was nitrogen application rates (N 0, 150, 300, 450 kg/hm^2). N_2O emission rate was determined using static chamber technology combined with gas chromatography in different treatments. The contribution of temperature, precipitation, nitrogen managements and the absorption of summer corn on N_2O emission was calculated. 【Results】The influence of meteorological conditions on the N_2O emission was significant. The impact factors of temperature and precipitation on the N_2O emission were -0.24 and -0.07 in 2012 and 2013, respectively. Nitrogen fertilization increased N_2O emission which followed a linear relationship with the increase of

收稿日期: 2014-12-11

接受日期: 2015-10-13

网络出版日期: 2015-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31101083, 31471414) 资助。

作者简介: 王良 (1988—), 男, 山东枣庄人, 硕士研究生, 主要从事农业信息化研究。E-mail: wangliang11.04@163.com

* 通信作者 E-mail: gqchen@sdau.edu.cn

N application rate ($R^2 = 0.923$). The effect of nitrogen application on N₂O emission was 0, 0.38, 1.63 and 3.54 when the N application rate was 0, 150, 300 and 450 kg/hm², respectively. The average impact factor of summer corn growth on the N₂O emission was -0.33, which did not differ between 2012 and 2013 ($P = 0.07$). At seedling stage, ear period and grain stage, the effect of summer corn growth on the N₂O emission was -0.57, -0.29 and -0.13, respectively, and had significant difference between growing stages ($P = 0.0015$). Climatic condition had no significant effect on N₂O emission on summer corn field under different nitrogen application rates ($P > 0.05$). With the different climates in years, there was no significant effect of summer corn growth on the N₂O emission with different temperature and precipitation under the same nitrogen application rate ($P > 0.05$).

【Conclusions】 Higher temperature and precipitation greatly stimulate N₂O. High nitrogen fertilization application leads to increased N₂O emission. Summer corn growth has a negative impact on N₂O emission, which varies significantly in different growing stages. Climate and crop absorption are the two main factors influencing N₂O emission when the nitrogen application rate is less than 150 kg/hm², and nitrogen application is the main factor when the nitrogen rate is higher than 300 kg/hm².

Key words: summer corn; farmland; nitrous oxide; impacting factor

N₂O 不仅是一种重要的温室气体,也是氮肥损失的重要途径之一。N₂O 排放总量的 80% 来自农业活动^[1-2],明确并量化各影响农田 N₂O 排放因素的影响率及关联,对减少 N₂O 排放及保护生态环境,合理利用氮肥,研究农田氮平衡,以及模拟农田氮运移模型具有重要意义。

土壤温度和含水量,氮肥的使用均影响着土壤 N₂O 的产生和排放^[3-7]。据农业部环境保护科研监测所监测,我国农用氮肥 N₂O-N 排放量 1990 年为 1000 ~ 1210 t,到 2020 年将增长到 1990 年的 3.27 ~ 5.32 倍^[8]。对玉米田土壤(施氮肥)和裸地土壤(未施氮肥)的比较发现,土壤-玉米系统中约有 1.25% 的化肥氮以 N₂O 的形式损失^[9]。种植作物影响着土壤中氮素的含量,在一定程度上降低了 N₂O 的排放^[10]。但作物根系影响产生 N₂O 的土壤微生物活性,促进了 N₂O 的产生^[11],作物本身对 N₂O 的传输也有一定的促进作用^[12]。玉米作为 C₄ 植物,高产潜力大,全国种植面积达 3510 万公顷^[13]。生产过程中的氮肥平均投入量约为 249 kg/hm²^[14]。夏玉米处于高温高湿环境,与 N₂O 排放有关的影响因素时空差异大。因此,量化分析气候因素、氮肥以及夏玉米生长吸收对 N₂O 排放的影响具有重要的理论意义。

本研究通过大田试验模拟单因素变量,采用单因素分析,确定气候、玉米生长吸收以及氮肥对夏玉米农田 N₂O 排放的影响。为作物、肥料和气象因子对农田 N₂O 排放的影响研究提供理论依据,并明确气候、氮肥以及玉米生长吸收对夏玉米农田 N₂O 排放影响率的变化规律。

1 材料与方法

1.1 分析方法

夏玉米农田 N₂O 排放主要受气候因素、氮肥管理以及夏玉米生长吸收三个因素的影响,因此 N₂O 排放量可用方程(1)表示:

$$E = E_{base} \times (1 + f_c) \times (1 + f_n) \times (1 + f_p) \quad (1)$$

方程(1)中,E 为 N₂O 排放量,E_{base} 为 N₂O 基础排放量,本研究假设在夏玉米播种前农田的排放量为基础排放量。f_c 为气候条件影响因子,f_n 为施氮影响因子,f_p 为夏玉米生长吸收影响因子。

本研究通过分析裸地不施氮肥处理下 N₂O 的排放动态,与基础排放量(某一气候条件下 N₂O 的排放量,本研究选择第一次取样时的气候条件为基础场景)相比较,模拟气候条件对 N₂O 排放的影响因子 f_c。

$$f_c = \frac{Ec' - Ec}{Ec} \quad (2)$$

方程(2)中,E_c 表示 N₂O 基础排放量,E_{c'} 为不同气候条件下不施氮裸地 N₂O 排放量。E_{c'} > E_c 时,影响因子 f_c 为正,说明该气候条件较基础场景的气候条件利于 N₂O 排放;否则影响因子为负,该气候条件较基础场景的气候条件抑制 N₂O 排放。

分析不同施氮水平裸地/玉米田 N₂O 排放的差异,模拟施氮对 N₂O 排放的影响因子 f_n。

$$f_n = \frac{En' - En}{En} \quad (3)$$

方程(3)中,En 为不同施氮水平裸地/玉米田的 N₂O

排放量, En' 为相同气候条件下不施氮裸地/玉米田 N_2O 排放量。

分析相同施氮水平条件下裸地与玉米田 N_2O 排放的差异, 模拟玉米生长对 N_2O 排放的影响因子 f_p 。

$$f_p = \frac{Ep' - Ep}{Ep} \quad (4)$$

方程(4)中, Ep 为不同施氮水平玉米田 N_2O 排放量, Ep' 为同一施氮水平裸地玉米田 N_2O 排放量。 $Ep' < Ep$, 影响因子 f_p 为负, 说明夏玉米生长吸收抑制 N_2O 排放。

1.2 试验设计

试验于 2012~2013 年在黄淮海地区大汶口镇 (东经 $117^{\circ}3'57''$, 北纬 $35^{\circ}58'8''$) 进行。试验田面积为 1260 m^2 ($14 \text{ m} \times 90 \text{ m}$), 0—20 cm 土层土壤含有机质 13.30 g/kg 、全氮 0.82 g/kg 、水解氮 85.87 mg/kg 、有效磷 27.48 mg/kg 、速效钾 129.70 mg/kg 、有效硫 43.35 mg/kg 。夏玉米品种为郑单 958, 种植密度 75000 plant/hm^2 。以夏玉米为研究对象, 设置裂区试验, 主区为作物处理, 副区为氮肥处理 (0、150、300、450 kg/hm^2 4 个氮肥处理), 设置三次重复。磷肥、钾肥、氮肥分别选用过磷酸钙 (含磷 14%)、硫酸钾 (含钾 50%)、尿素 (含氮 46%), 磷肥和钾肥作为基肥, 分别为 147 kg/hm^2 、 450 kg/hm^2 ; 氮肥播种期施入 40%, 大喇叭口期施入 60%。

1.3 样品采集及数据处理

N_2O 排放通量采用静态暗箱-气相色谱法测定。静态箱底座 ($60 \times 50 \times 25 \text{ cm}^3$) 打入玉米行间土壤中, 底座上部设有水槽 (取样前倒入水, 用于密封), 上部箱体 ($60 \times 50 \times 50 \text{ cm}^3$) 卡在底座, 箱体内

置风扇用于混匀箱内气体。气体采集时间定在上午 9:00~11:00 之间。每个处理连续采集气样 4 次, 每次间隔 15 min, 同时测定箱内温度^[15], 平时 1 次/10 天, 追氮肥后 1 次/天。所采气样及时用气相色谱岛津 GC2010 进行测定^[16]。采用 4 m 长的 Porapak Q 填充柱, 以 N_2 做载气, 检测器为电子捕获检测器 (ECD), 设 ECD 检测温度 300°C , 逐项温度为 45°C , 载气总流量 40 mL/min , 尾吹流量 40 mL/min 。

N_2O 通量计算公式为:

$$F = \frac{273}{273 + t} \times \frac{28}{22.4} \times 60 \times 10^{-3} \times H \times \frac{dc}{dt} \quad (5)$$

式中, F 为 N_2O 排放通量 [$\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]; t 为箱内温度; 28 为每 mol N_2O 分子中 N 的质量数; 22.4 为温度为 273K 时的 N_2O 摩尔体积; H 为采样箱高度 (cm); c 为 N_2O 气体浓度 ($\mu\text{L/L}$); t 为关箱时间 (min); dc/dt 为采样箱内 N_2O 气体浓度的变化率 [$\mu\text{L}/(\text{L} \cdot \text{min})$]。

试验数据用 SPSS 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 气候因子对 N_2O 排放的影响

不施氮肥裸地下 2012 年和 2013 年 N_2O 平均排放量分别为 0.624 和 0.504 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 气候条件的影响因子分别为 -0.24 和 -0.07 (图 1)。2012 年降雨频繁, 气候条件对 N_2O 排放的影响较复杂, 影响因子出现三次峰值分别为 1.64、0.63 和 0.05。2013 年降雨较少, N_2O 排放主要受温度变化的影响, 气候条件对 N_2O 排放影响因子的变化趋势与温度的变化趋势相同, 最大影响率为 1.18。

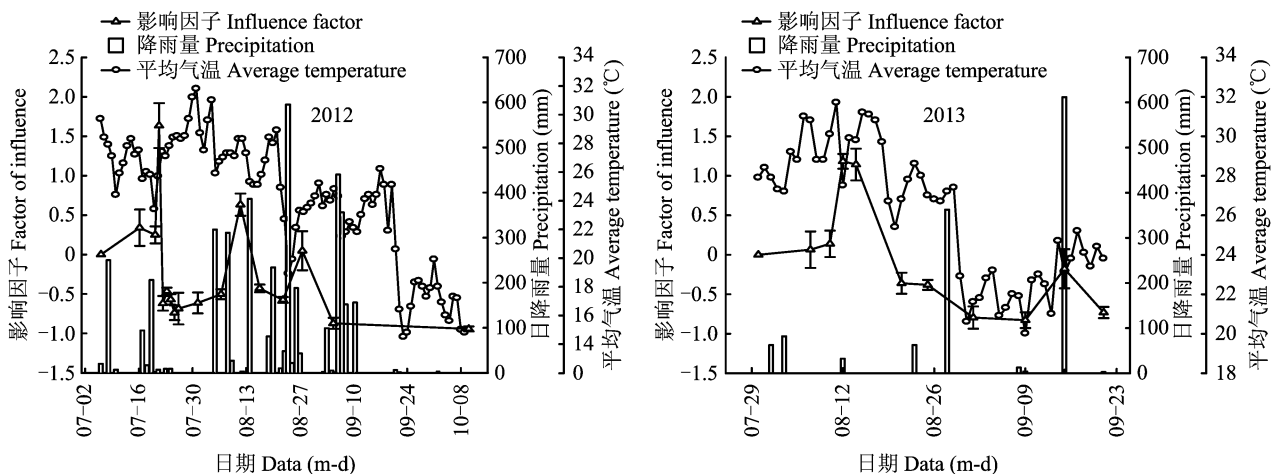


图 1 2012 年和 2013 年平均气温、降雨量对 N_2O 排放的影响

Fig. 1 The influence of average temperature, rainfall on the N_2O emission rate in 2012 and 2013

2.2 氮肥对 N_2O 排放的影响

施氮水平由 0 提高到 450 kg/hm^2 , N_2O 排放显著增大,氮肥的影响因子与施氮量存在一定的线性关系(图 2)。施氮量 150、300 和 450 kg/hm^2 时,施氮对裸地 N_2O 排放的平均影响因子分别是 0.49、

0.72、1.07,对玉米田 N_2O 排放的平均影响因子分别是 0.38、1.63、3.54。追肥后施氮对 N_2O 排放的影响最为显著,对裸地 N_2O 排放的影响因子分别为 1.93、2.76、5.03,对玉米田的影响因子分别为 3.95、6.13、10.12。

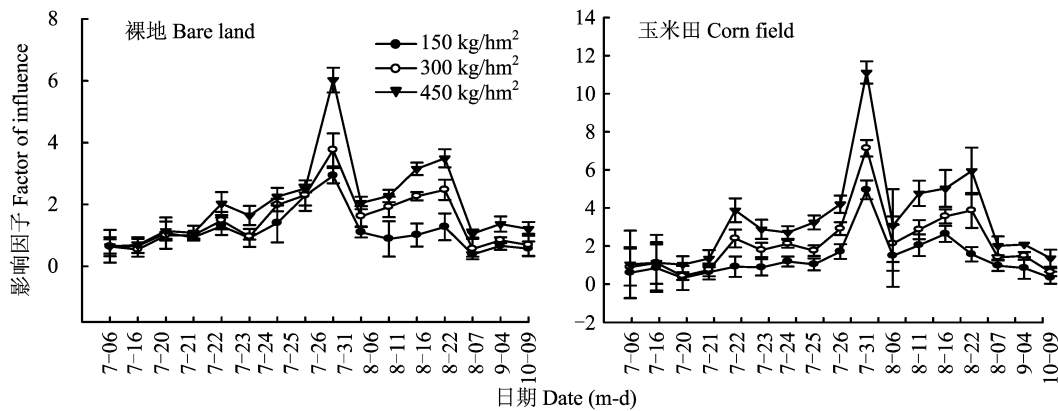


图 2 2012 年不同施氮量裸地和玉米田 N_2O 排放

Fig. 2 N_2O emission in the bare land and corn field under different N application rate in 2012

2.3 夏玉米生长对 N_2O 排放的影响率

夏玉米生长吸收对农田 N_2O 排放的平均影响因子为 -0.33 ± 0.01 , 即夏玉米生长吸收降低了 N_2O 的排放量。随着夏玉米生长发育成熟,对 N_2O 排放的影响逐渐减小。在苗期、穗期、花粒期,夏

玉米生长吸收对 N_2O 排放的影响率分别为 -0.57 ± 0.01 、 -0.29 ± 0.05 和 -0.13 ± 0.06 , 不同生育期间差异显著 ($P < 0.05$)。灌水后短时间内,夏玉米生长吸收对 N_2O 排放的影响减小,甚至促进 N_2O 的排放(图 3)。

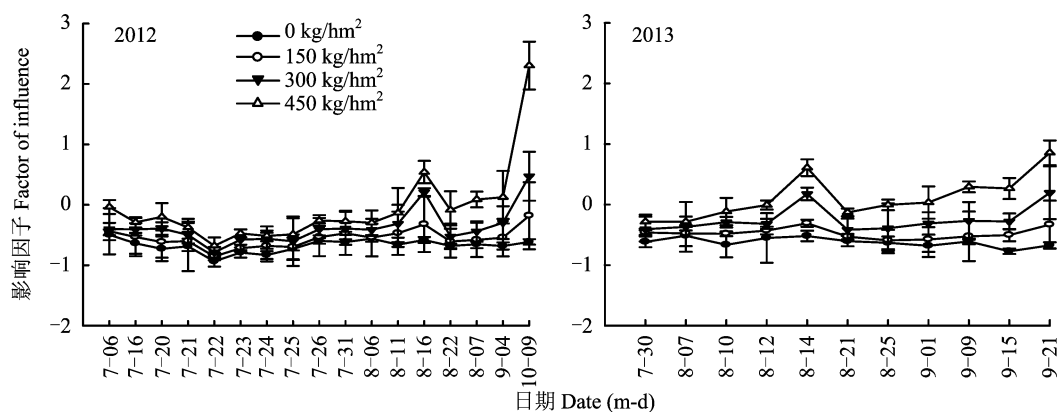


图 3 2012 年和 2013 年夏玉米生长对 N_2O 排放的影响

Fig. 3 The influence of summer corn growth on N_2O emission in 2012 and 2013

2.4 影响因素比较分析

2012 年与 2013 年气候条件不同,相同施氮量条件下气候条件对 N_2O 排放的影响存在明显差异。表 1 表明,施氮量 $\leq 150 \text{ kg/hm}^2$ 时,2012 年玉米生长吸收的影响因子最大,而 2013 年气候条件的影响因子最大;施氮量 $\geq 300 \text{ kg/hm}^2$ 时,2012 年和 2013

年施氮的影响因子均为最大。而同一施氮水平 2012 年与 2013 年施氮和玉米生长吸收对 N_2O 排放的影响一致。随着施氮量的增加,施氮对 N_2O 排放的影响因子显著增大;玉米生长吸收对 N_2O 排放的影响因子逐渐减小。因此,高施氮量时(施氮量 $\leq 300 \text{ kg/hm}^2$),氮肥因素比气候和玉米生长吸收因素

表 1 不同施氮量下气候条件、施氮、玉米生长吸收对玉米田 N_2O 排放量的影响率Table 1 The effect of climatic conditions, nitrogen application and corn growth on corn field N_2O emission

年份 Year	因子 Factor	氮肥用量 N rate (kg/hm ²)			
		0	150	300	450
2012	气候 Climate	-0.25	-0.2	0.22	0.99
	氮水平 N rate	0	0.37	1.63	3.54
	玉米 Corn	-0.67	-0.55	-0.37	-0.06
2013	气候 Climate	-0.83	-0.8	-0.77	-0.73
	氮水平 N rate	0	0.39	1.69	3.55
	玉米 Corn	-0.59	-0.51	-0.37	-0.08

的影响大,促进了 N_2O 的排放。低施氮量时(施氮量 $\leq 150 \text{ kg/hm}^2$),气候因素和玉米生长吸收因素均对 N_2O 排放产生负影响,且随着施氮量的增加影响因子增大,即负影响减小。

3 讨论

土壤中 N_2O 的产生是一个复杂的物理、化学和生物学过程^[17],所有影响这一复杂物理、化学和生物学过程的因素均影响土壤 N_2O 的排放量。气候条件的变化一定程度上决定土壤温度、含水量的变化^[3]。一般认为 N_2O 排放量与土壤温度相关性较高,土壤 N_2O 排放通量与温度之间呈显著正相关^[18-22]。这与本研气候条件影响因子随温度的变化表现出明显差异的研究结果一致,随着温度的升高气候条件对 N_2O 排放的影响因子增大。土壤含水量对 N_2O 产生和排放的影响主要通过影响产生 N_2O 的硝化、反硝化过程以及影响土壤的通气状况,同时进一步影响土壤 O_2 的有效性和 N_2O 由产生部位到大气中的传输^[23-26]。因此, N_2O 的排放不仅与温度有关,与降雨量也有关系。随温度升高, N_2O 排放速率明显增加;随土壤含水量的增大, N_2O 排放速率亦明显加快^[27]。土壤温度直接影响土壤中微生物活性和各种化学反应速率,进而影响土壤中 N_2O 的产生和扩散。而土壤含水量对土壤 N_2O 排放的影响较复杂。土壤含水量较低时,土壤处于好氧条件, N_2O 的产生主要来自于硝化作用;土壤含水量较高时,硝化、反硝化作用在一定湿度范围内同时进行;土壤含水量较大甚至接近饱和时,反硝化作用较强,但产生的 N_2O 由于水分填充土壤空隙,向大气传输过程受阻,进一步还原为 N_2 , N_2O 排放量反而减小^[23-25]。温度与降雨的交互影响是气候影响因子规律性不强的根本原因。2012 年降雨

量较 2013 年大且频繁,气候条件对 N_2O 综合排放的影响较 2013 年大,但 2012 年和 2013 年夏玉米生长期气温变化趋势相似,气候条件对 N_2O 影响的变化走势较相似,即降雨和温度的共同作用引起气候条件对土壤 N_2O 排放影响的差异,温度效应大于降雨效应。

施氮量的增加显著增加了 N_2O 的排放量^[24]。本研究中氮肥影响因子随施氮量增加至线性增大的结果再次验证了这一结论。施氮利于土壤微生物活性的提高,促进硝化、反硝化作用,部分 N 以 N_2O 的形式排入大气;施氮增加植株尤其是根生物量的增加,土壤微生物获得更多的碳源,为硝化作用提供能量^[28]。施入的尿素经过水解以 NH_4^+ 的形式注入土壤,注入农田系统的 NH_4^+ 是土壤硝化作用产生 N_2O 的第一底物,其浓度直接影响土壤硝化作用的强度,极大的促进了 N_2O 的排放。当施氮量 $\leq 150 \text{ kg/hm}^2$ 时, N_2O 排放随尿素水解量的增加而加快^[29],此时施氮对 N_2O 排放的影响因子在追肥后随时间推移而增大。当施氮量 $> 150 \text{ kg/hm}^2$ 时,大量尿素水解产生高浓度的 NH_4^+ ,高浓度的 NH_4^+ 导致 pH 降低反而抑制了硝化反应的进行^[25-26]。因此,只在一定范围内,施氮对 N_2O 排放的影响因子随施氮量的增加而增大。

作物生长吸收消耗土壤溶液中的氮素,直接减小硝化反硝化作用的底物浓度,进而减少 N_2O 的排放^[30];也能通过将含有 N_2O 的土壤水吸进体内后,通过浓度梯度可将 N_2O 排放到大气中促进 N_2O 的排放^[23];还能通过根系的呼吸作用和根系分泌的有机质的分解使根区附近 O_2 压降低,造成嫌气环境,促进土壤的反硝化作用和 N_2O 的产生。本研究结果表明,夏玉米生长吸收对农田 N_2O 排放产生负影响,表明夏玉米生长吸收消耗土壤溶液中氮素,减

少硝化、反硝化作用底物浓度,抑制硝化、反硝化作用,且其在对农田 N_2O 排放的影响过程中占主导地位。夏玉米植株在生长发育过程中,在不同生育时期对土壤氮素需求不同,吸收消耗土壤氮素量不同,对土壤 N_2O 排放的影响也因此有所差异。夏玉米生长吸收对农田 N_2O 排放的影响因子在苗期、穗期、花粒期差异显著,而同一时期内的影响因子小范围的波动。

气候条件、施氮和夏玉米生长吸收三因素之间交互影响,气候条件影响施入土壤氮肥的转化;夏玉米植株的吸氮量在一定程度上与施氮量密切相关^[31];气候变化也与夏玉米的生长发育密切相关。温度、降雨等气候条件通过影响土壤水、热状况,直接影响 N_2O 的排放,同时还会影响尿素在土壤中的转化^[29],间接影响土壤中硝化、反硝化作用底物浓度,最终影响 N_2O 的排放。温度、含水量和底物浓度均直接影响硝化、反硝化作用^[32-33],影响 N_2O 的产生。本研究也发现,不同气候条件下随着施氮量的增加,气候条件对 N_2O 排放的影响存在差异,且相同气候条件下不随施氮量的增加显著增大。对于气候条件与氮肥管理因素在影响夏玉米农田 N_2O 排放过程中的交互作用,在模型计算中一般采用乘积法。本研究发现随着施氮量的增加玉米植株生长吸收对 N_2O 排放的影响减小,这又一次说明了施氮因素与夏玉米生长吸收因素在夏玉米农田 N_2O 排放过程中的交互作用。一方面由于施氮量的增加为硝化、反硝化作用提供充足的底物,另一方面由于玉米植株吸氮不与施氮量呈显著线性相关关系,低施氮量时,随着施氮量的增加夏玉米植株的吸氮量明显增加;施氮量继续增加时,植株吸氮量大幅度增加;而施氮过量时,植株吸氮量增加减小,但土壤中氮累积量始终随施氮量的增加而增大^[34-36]。而夏玉米植株对氮素的吸收又影响了氮素在土壤中的分布。

4 结论

气候条件对 N_2O 排放的影响因子与气温和降雨量密切相关,温度升高影响增大,反之则减小,降雨后排放显著增大。施氮对 N_2O 排放的影响因子随施氮量增加线性增加($R^2 = 0.923$)。夏玉米生长吸收降低了 N_2O 排放,不同生育期的影响因子差异显著($P = 0.0015$),在苗期影响最大,花粒期的影响最小。综合各影响因子,低施氮量条件下($\text{N} \leq$

150 kg/hm^2),气候因素和夏玉米生长吸收因素对 N_2O 排放的影响较大;而高施氮量条件下($\text{N} \geq 300 \text{ kg/hm}^2$),施氮是影响 N_2O 排放的主要因子,促进了 N_2O 的排放。

参考文献:

- [1] IPCC, Working Group III. Greenhouse gas mitigation in agriculture [R]. Fourth Assessment Report, 2006.
- [2] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [M]. IPCC/IGES, Havana, Japan, 2006.
- [3] 蔡延江,丁维新,项剑,等. 农田土壤 N_2O 和 NO 排放的影响因素及其作用机制[J]. 土壤, 2012, 44(6): 881-887.
Cai Y J, Ding W X, Xing J, et al. Factors controlling N_2O and NO emissions from agricultural soils and their influencing mechanisms: A review[J]. Soils, 2012, 44(6): 881-887.
- [4] Mosier A R, Halvorson A D, Reule C A, et al. Net global warming potential and greenhouse gas intensity in irrigated cropping systems in northeastern Colorado [J]. Journal of Environmental Quality, 2006, 35(4): 1584-1598.
- [5] Halvorson A D, Grosso S J D, Reule C A. Nitrogen, tillage, and crop rotation effects on nitrous oxide emissions from irrigated cropping systems[J]. Journal of Environmental Quality, 2008, 37(4): 1337-1344.
- [6] Mcswiney C P, Robertson G P. Nonlinear response of N_2O flux to incremental fertilizer addition in a continuous maize (*Zea mays* L.) cropping system [J]. Global Change Biology, 2005, 11(10): 1712-1719.
- [7] Grant R F, Pattey E, Goddard T W, et al. Modeling the effects of fertilizer application rate on nitrous oxide emissions [J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(1): 235-248.
- [8] 武其甫,武雪萍,李银坤,等. 保护地土壤 N_2O 排放通量特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 942-948.
Wu Q F, Wu X P, Li Y K, et al. Studies on the fluxes of nitrous oxide from greenhouse vegetable soil [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(4): 942-948.
- [9] 陈书涛,黄耀,郑循华,等. 种植不同作物对农田 N_2O 和 CH_4 排放的影响及其驱动因子[J]. 气候与环境研究, 2007, 12(2): 148-155.
Chen S T, Huang Y, Zheng X H, et al. Nitrous oxide and methane emissions from croplands with different crops and driving factors[J]. Climatic and Environmental Research, 2007, 12(2): 148-155.
- [10] Scott S M and Tiedje M J. The effect of roots on soil denitrification [J]. Soil Science Society of America Journal, 1979, 43(5): 951-957.
- [11] Philippot L, Kuffner M, Cheneby D, et al. Genetic structure and activity of the nitrate-reducers community in the rhizosphere of different cultivars of maize[J]. Plant and Soil, 2006, 287(1/2): 177-186.
- [12] 黄国宏,陈冠雄,黄斌,等. 玉米植株对大田温室气体 N_2O 排放的影响[J]. 应用生态学报, 1998, 9(3): 261-264.
Huang G H, Chen G X, Huang B, et al. Effect of maize plant on N_2O emission from field [J]. Chinese Journal of Applied

- Ecology, 1998, 9(3): 261–264.
- [13] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China year book [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2013.
- [14] Ravishankara A R, Daniel J S, Portmann R W. Nitrous oxide (N_2O): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century[J]. Science, 2009, 326(5949): 123–134.
- [15] 万运帆, 李玉娥, 林而达, 等. 静态箱法测定旱地农田温室气体时密闭时间的研究[J]. 中国农业气象, 2005, 27(2): 122–124.
Wan Y F, Li Y E, Lin E D, *et al.* Studies on closing time in measuring greenhouse gas emission from dry cropland by static chamber method[J]. Chinese Journal of AgroMeteorology, 2005, 27(2): 122–124.
- [16] 田慎重, 宁堂原, 迟淑筠, 等. 不同耕作措施的温室气体排放日变化及最佳观测时间[J]. 生态学报, 2012, 32(3): 879–888.
Tian S Z, Ning T Y, Chi S J, *et al.* Diurnal variations of the greenhouse gases emission and their optimal observation duration under different tillage systems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(3): 879–888.
- [17] Parton W J, Mosier A R, Ojima D S, *et al.* Generalized model for N_2 and N_2O production from nitrification and denitrification [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10(3): 401–412.
- [18] Conrad R, Seiler W, Bunse G. Factors influencing the loss of fertilizer nitrogen into the atmosphere as nitrous oxide [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 1983, 88: 6709–6718.
- [19] 张小洪, 袁红梅, 蒋文举, 等. 油菜地 CO_2 、 N_2O 排放及其影响因素[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(3): 5–8.
Zhang X H, Yuan H M, Jiang W J, *et al.* CO_2 and N_2O emission from the rape field and their controlling factors [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2007, 23(3): 5–8.
- [20] Zheng X H, Huang Y, Wang Y S, *et al.* Effects of soil temperature on nitrous oxide emission from a typical Chinese rice-wheat rotation during the non-waterlogged period [J]. Global Change Biology, 2003, 9: 601–611.
- [21] 陈卫卫, 张友民, 王毅勇, 等. 三江平原稻田 N_2O 通量特征[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 364–368.
Chen W W, Zhang Y M, Wang Y Y, *et al.* Characteristics of N_2O fluxes in paddy fields of the Sanjiang Plain[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(1): 364–368.
- [22] Jiang C S, Wang Y, Zhang X H, *et al.* Methane and nitrous oxide emissions from three paddy rice based cultivation systems in southwest China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2006, 23(3): 415–424.
- [23] 李香兰, 徐华, 蔡祖聪, 等. 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 X L, Xu H, Cai Z C, *et al.* Effect of water management on nitrous oxide emission from rice paddy field: A review [J]. Soils, 2009, 41(1): 1–7.
- [24] Novoa R, Tejeda H R. Evaluation of the N_2O emissions from N in plant residues as affected by environmental and management factors [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2006, 75: 23–29.
- [25] Malhi S S, McGill W B. Nitrification in three Alberta soils: Effect of temperature, moisture and substrate concentration[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1982, 14: 393–399.
- [26] Harada T, Kai H. Studies on the environmental conditions controlling nitrification in soils. I. Effects of ammonium and total salts in media on the rate of nitrification[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1968, 14: 20–26.
- [27] 王改玲, 陈德立, 李勇, 等. 土壤温度、水分和 NH_4^+ -N 浓度对土壤硝化反应速度及 N_2O 排放的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 1–6.
Wang G L, Chen D L, Li Y, *et al.* Effect of soil temperature, moisture and NH_4^+ -N concentration on nitrification and nitrification-induced N_2O emission[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(1): 1–6.
- [28] 宋长春, 张丽华, 王毅勇, 赵志春. 淡水沼泽湿地 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放通量年际变化及其对氮输入的响应[J]. 环境科学, 2006, 27(12): 2369–2375.
Song C C, Zhang L H, Wang Y Y, Zhao Z C. Annual dynamics of CO_2 , CH_4 , N_2O emissions from freshwater marshes and affected by nitrogen fertilization [J]. Environmental Science, 2006, 27(12): 2369–2375.
- [29] Skiba U, Wainwright M. Urea hydrolysis and transformations in coastal dune sands soil[J]. Plant and Soil, 1984, 82(1): 117–123.
- [30] 杨思河, 陈冠雄, 林继惠, 等. 几种木本植物的 N_2O 释放与某些生理活动的关系[J]. 应用生态学报 1995, 6(4): 337–340.
Yang S H, Chen G X, Lin J H, *et al.* N_2O emission from woody plants and its relation to their physiological activities [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1995, 6(4): 337–340.
- [31] Du H X, W P T, Feng H, *et al.* Influence of nitrogen application on soil moisture-nitrogen dynamics and water-fertilizer use efficiency of *Zea mays* [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(4): 82–87.
- [32] Barnard R, Leadley P W, Hungate B A. Global change, nitrification, and de-nitrification: A review [M]. Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19(1).
- [33] Dobbie K E, Smith K A. The effects of temperature, water-filled pore space and land use on N_2O emissions from an imperfectly drained gleysol[J]. European Journal of Soil Science, 2001, 52(4): 667–673.
- [34] Bergstrom L, Brink N. Effects of differentiated applications of fertilizer N leaching losses and distribution of inorganic N in soil [J]. Plant and Soil, 1986, 93(3): 333–345.
- [35] Liang B C, Mackenzie A F. Changes of soil nitrate-nitrogen and de-nitrification as affected by nitrogen fertilizer on two Quebec soil [J]. Journal of Environmental Quality, 1994, 23(3): 521–525.
- [36] 范丙全, 胡春芳, 平建立. 灌溉施肥对壤质潮土硝态氮淋溶的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(1): 16–21.
Fan B Q, Hu C F, Ping J L. Effect of irrigation and fertilization on nitrate leaching in loamy fluvo-aquic soil [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1998, 4(1): 16–21.