

外加可溶性碳氮对不同热量带土壤 N₂O 排放的影响

朱 霞^{1,2,3}, 韩晓增¹, 乔云发¹, 王守宇¹

(1.中国科学院东北地理与农业生态研究所, 哈尔滨 150081; 2.中国科学院成都生物研究所, 成都 610041; 3.中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要:在室内条件下研究了外加可溶性碳、氮对不同热量带经长期施肥的 3 种农田土壤:黑土、潮褐土和红壤 N₂O 排放的影响。结果表明,在单施氮肥和可溶性碳配施氮条件下,不同热量带土壤 N₂O 排放量从高到低分别为潮褐土(0.868、3.07 μg·g⁻¹),红壤(0.511、0.731 μg·g⁻¹),黑土(0.221、0.294 μg·g⁻¹),且添加可溶性碳显著促进了土壤 N₂O 排放量。在黑土、潮褐土和红壤长期不同施肥土壤中,单施氮肥和可溶性碳配施氮后 N₂O 排放量均表现为化肥+有机肥土壤>化肥土壤>无肥土壤,且与无肥土壤相比,红壤的化肥土壤 N₂O 排放量增加 254%,潮褐土化肥土壤增加 49.5%,黑土化肥土壤增加 1.74%,说明在有效积温越高的土壤上长期施肥对土壤 N₂O 损失的贡献越大。研究结果还表明,外加可溶性碳、氮后,潮褐土铵态氮含量的减少幅度和硝态氮含量的增加幅度均显著高于黑土和红壤,说明潮褐土中氮素损失潜能大。

关键词:N₂O 排放;可溶性碳;氮肥;长期施肥;不同热量带

中图分类号:X511 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)12-2637-08

Influence of Soluble Carbon and Nitrogen on N₂O Emission from Different Thermal Zones Soil

ZHU Xia^{1,2,3}, HAN Xiao-zeng¹, QIAO Yun-fa¹, WANG Shou-yu¹

(1.Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China; 2.Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 3.Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A laboratory experiment was conducted to study the influence of soluble carbon and nitrogen on nitrous oxide emission from different thermal zones soil, such as black soil, red soil and cinnamon soil. Results showed that the amount of N₂O emission in cinnamon soil ranged from 0.868 to 3.07 μg·g⁻¹, which in red soil from 0.511 to 0.731 μg·g⁻¹ and from 0.221 to 0.294 μg·g⁻¹ in red soil applied with only nitrogen or nitrogen amended with soluble carbon. Moreover, soluble carbon increased N₂O emission if it was amended with nitrogen. The amount of N₂O emission was in an order of NPKOM > NPK > CK, regardless of soil types and experiment treatments. It showed that long-term fertilization increased N₂O emission, and amounts of increase were 1.74%, 49.5%, 254% in black soil, cinnamon soil and red soil separately. In addition, the variances of NH₄⁺-N and NO₃⁻-N contents in cinnamon soil were larger than other soils, which suggested that cinnamon soil had high potential of nitrogen loss.

Keywords: nitrous oxide emissions; soluble carbon; nitrogen; long-term fertilization; different thermal zones

N₂O 是一种重要的温室效应气体,其单位质量增温潜势是 CO₂ 的 298 倍(以 100 年为时间尺度)^[1],对全球变暖的贡献约占全部温室气体总贡献的 5%~

6%,它还参与破坏平流层臭氧,增强地表的紫外辐射,并且正以每年 0.2%~0.3%的速度增长^[2]。影响土壤 N₂O 排放的因素很多,主要有土壤质地、pH 值、温度、水分、施肥种类等^[3-7]。在农田土壤中,长期施肥通过改变一些重要的土壤理化特性^[8-9],使同一土壤发生肥力差异,进而影响到土壤 N₂O 的排放^[3]。而长期施肥对土壤理化特性的改变还因土壤所处热量带的不同而有很大差异,进而表现出在试验条件一致的情况下不同热量带土壤 N₂O 排放存在一定差异。

近年来,国内外对土壤 N₂O 排放的研究较多^[10-12],但这些研究均是在局部地区针对某一类型土

收稿日期:2009-09-17

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-407);
国家科技支撑计划(2006BAD05B05);中国科学院知识创新工程重大项目(KSCX1-YW-09-09)

作者简介:朱 霞(1985—),女,硕士研究生,研究方向为土壤化学与生态环境。E-mail: zhuxia0207@163.com

责任作者:韩晓增 E-mail: hanxz@cern.ac.cn

壤单独进行的研究,而相同水热条件下对于中国不同热量带土壤在经长期施肥后 N₂O 排放差异的研究至今未见系统报道。为此,本研究通过培养试验观测了采自黑土、潮褐土、红壤长期定位施肥试验地的 8 个土样添加可溶性碳和氮后的 N₂O 排放,分析了不同热量带土壤 N₂O 排放的变化特征,以期为保持我国农田生态系统中土壤氮素养分库持续发展,减少氮素向环境迁移提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

黑土采自中国科学院海伦农业生态实验站长期定位试验地(N47°26',E126°38',海拔 240 m,年均温度 1.5℃,≥10℃有效积温 2 780℃,无霜期 150 d;该试验始于 1990 年),小区土壤的 3 个处理分别为①CK:对照,不施肥;②NPK:施氮、磷、钾化肥;③NPKOM:有机肥+氮、磷、钾。随机排列,4 次重复。

潮褐土采自中国科学院栾城农业生态实验站长期定位试验地(N37°50',E114°40',海拔 50.1 m,年均温度 12.2℃,≥10℃有效积温 4 232℃,无霜期 200 d;该试验始于 1989 年),小区土壤的 2 个处理分别为①CK:对照,不施肥;②NPK:施氮、磷、钾化肥。随机排列,4 次重复。

红壤采自中国科学院鹰潭农业生态实验站长期定位试验地(N28°12',E116°55',海拔 26 m,年均温度 17.6℃,≥10℃有效积温 5 528℃,无霜期 262 d;该试验始于 1989 年),小区土壤的 3 个处理分别为①CK:对照,不施肥;②NPK:施氮、磷、钾化肥;③NPKOM:有机肥+氮、磷、钾。随机排列,4 次重复。

所有土样样品均于 2008 年春天进行采集,采样深度均为表层 0~20 cm,每小区随机取 4 个点,混合制样,风干过 2 mm 孔筛,保存。供试土壤主要理化性状见表 1。

1.2 研究方法

1.2.1 试验处理

试验设计以可溶性碳和氮为外加物在室内条件下模拟田间施化肥和有机肥进行研究,所用可溶性碳源为葡萄糖(Glu),氮源为硫酸铵(NH₄⁺-N),碳氮配施量按 C/N 比值为 10 施入,具体处理如下:①Control(不添加任何 Glu 和 N,为对照处理);②N(0.4 g·kg⁻¹);③Glu(1%)+N(0.4 g·kg⁻¹),每个处理 3 次重复。

1.2.2 氧化亚氮排放测定

称风干土 50 g 放入圆柱形采气瓶中(10 cm

表 1 供试土壤理化性状					
Table 1 Physicochemical characteristic of the tested soil					
土壤类型	处理	有机质/ g·kg ⁻¹	全氮/ g·kg ⁻¹	碱解氮/ mg·kg ⁻¹	pH(H ₂ O)
黑土	CK	45.8	2.09	182	5.55
	NPK	48.2	2.20	218	5.06
	NPKOM	51.4	2.53	228	6.01
潮褐土	CK	25.3	1.14	75.5	7.88
	NPK	28.7	1.40	148	8.09
红壤	CK	9.93	0.841	60.8	4.45
	NPK	13.6	1.07	78.1	5.82
	NPKOM	16.4	1.24	90.8	5.64

height×6 cm diameter),加入适量蒸馏水润湿土壤,培养 10 d(以消除干湿效应)^[3],按试验处理将所需碳源和氮源溶入蒸馏水,均匀加入采气瓶,调节瓶中土壤水分为 65%田间持水量,放在恒温室(25℃)进行培养,培养期间保持水分一致。于试验开始第 1、1.5、2、3、4、5、7、9、11、13、17、21 d 用带有开关的 1 mL 针筒采集气体样品,采样时密闭采气瓶,分别于密闭后 0、10、20、30 min 采集瓶中上部分气体,采完样立即打开瓶盖。N₂O 用气相色谱(GC 2010)测定,检测器为电子捕获检测器(ECD),分离柱为 Porapak Q 填充物分离柱;载气为高纯度的 N₂,流速 20 mL·min⁻¹。分离柱工作温度 75℃,检测器工作温度 350℃。

1.2.3 土壤无机氮含量测定

称取风干土 100 g 放入 250 mL 广口瓶中,按试验处理将所需的碳源和氮源溶入蒸馏水,均匀加入到广口瓶中,调节瓶中土壤水分为 65%田间持水量,放在恒温室(25℃)进行培养。分别于试验开始当天和试验结束当天采集瓶中土样。采集的土样用 1 mol·L⁻¹ KCl 溶液浸提,浸提液用连续流动分析仪(荷兰 SKALAR San⁺)测定铵态氮和硝态氮含量

1.3 数据分析

ANOVA 采用 SAS(9.0)软件,Duncan(SSR)方法分析各处理间平均数在 P=0.05 和 P=0.01 水平的差异显著性,做图工具为 Sigmaplot(10.0)。

2 结果与分析

2.1 外加可溶性碳、氮后不同热量带土壤 N₂O 排放的变化

2.1.1 土壤 N₂O 排放速率的变化

由图 1 发现,施用氮肥后土壤 N₂O 排放速率因土壤类型不同和可溶性碳的添加而呈现出一定变化。与

对照相比,整个试验期单施氮肥处理和可溶性碳配施氮处理均使土壤 N_2O 排放速率显著增高;与单施氮肥相比,可溶性碳的添加促进了土壤 N_2O 的排放。同时由图 1 还可看出,在单施氮肥和可溶性碳配施氮处理下,不同热量带土壤 N_2O 排放速率变化特征相似,其中潮褐土 N_2O 排放速率峰值均高于黑土和红壤。在试验开始的第 1~13 d 期间,单施氮处理下黑土 N_2O

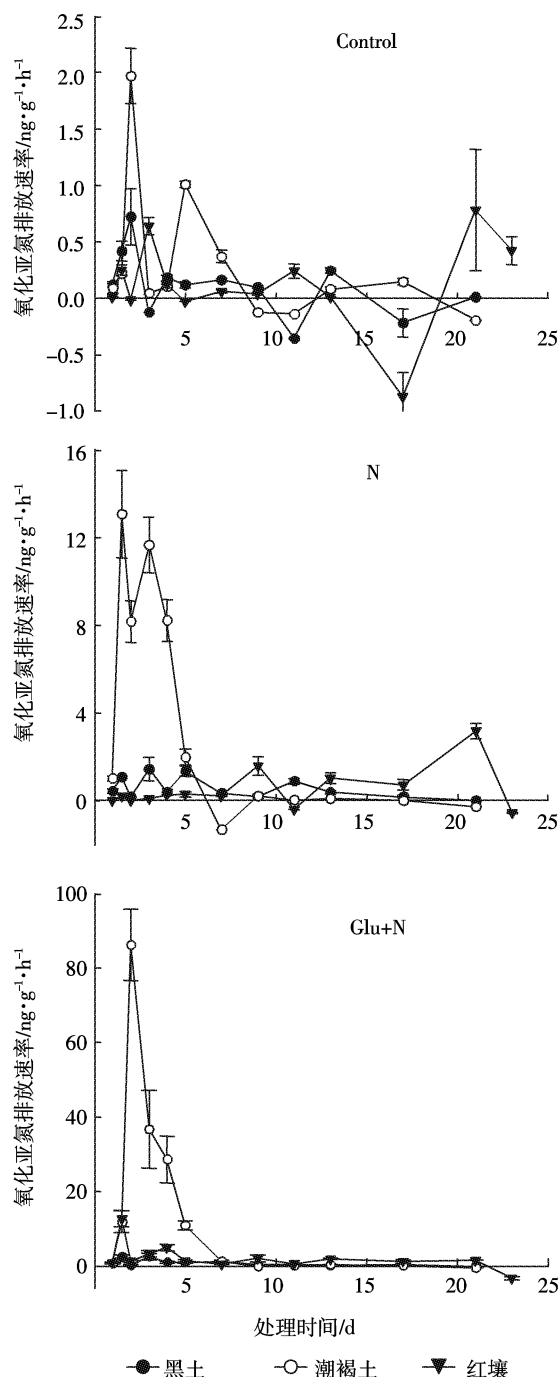


图 1 外加可溶性碳、氮后不同热量带土壤(NPK) N_2O 排放速率
Figure 1 Emissions of nitrous oxide from different thermal zones soil after addition of soluble C and N

排放速率变化范围为 $0.220\sim 1.45 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, 潮褐土 N_2O 排放速率变化范围为 $-1.31\sim 13.1 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, 红壤 N_2O 排放速率变化范围为 $-0.390\sim 1.60 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$; 可溶性碳配施氮处理下黑土氧化亚氮排放速率变化范围为 $0.290\sim 2.65 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, 潮褐土 N_2O 排放速率变化范围为 $-0.100\sim 86.2 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, 红壤 N_2O 排放速率变化范围为 $0.661\sim 12.8 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

2.1.2 土壤 N_2O 排放总量

土壤中的 N_2O 主要来源于微生物活动引起的硝化和反硝化过程。从图 2 可知,在试验各处理下,不同热量带土壤 N_2O 排放总量存在显著差异($P<0.05$)。在对照处理下,潮褐土 N_2O 排放总量为 $0.09 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,是黑土的 6.83 倍,是红壤的 1.62 倍;在单施氮肥处理下,潮褐土 N_2O 排放总量为 $0.87 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,是黑土的 3.93 倍,是红壤的 1.70 倍;在可溶性碳配施氮肥处理下,潮褐土 N_2O 排放总量为 $3.07 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,是黑土的 10.5 倍,是红壤的 4.21 倍。由此说明,在对照、单施氮肥和可溶性碳配施氮肥处理下,潮褐土 N_2O 排放总量均大于黑土和红壤。

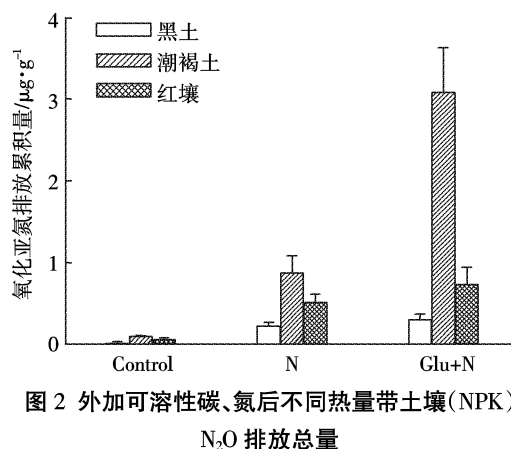


图 2 外加可溶性碳、氮后不同热量带土壤(NPK) N_2O 排放总量
Figure 2 Total amounts of nitrous oxide emissions in different thermal zones soil after addition of soluble C and N

从图 2 还可看出,与对照相比,单施氮肥处理显著增加了土壤 N_2O 排放总量 ($P<0.05$), 其中潮褐土 N_2O 排放总量增加 $0.78 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,是黑土 N_2O 排放总量增加量的 3.71 倍,是红壤 N_2O 排放总量增加量的 1.72 倍;与单施氮肥处理相比,可溶性碳配施氮肥促进了土壤 N_2O 排放,其中潮褐土 N_2O 排放总量增加 $2.21 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,是黑土 N_2O 排放总量增加量的 30.2 倍,是红壤 N_2O 排放总量增加量的 10.1 倍。

2.2 外加可溶性碳、氮对长期施肥黑土 N_2O 排放的影响

2.2.1 黑土 N_2O 排放速率的变化

当可溶性碳、氮施入长期不同施肥黑土后, N_2O

排放速率产生明显差异。从图 3 可知,在试验开始的第 1~13 d 期间,单施氮处理下无肥土壤 N₂O 排放速率变化范围为-0.491~1.46 ng·g⁻¹·h⁻¹,化肥土壤 N₂O 排放速率变化范围为 0.222~1.45 ng·g⁻¹·h⁻¹,化肥+有机肥土壤 N₂O 排放速率变化范围为 0.041~3.85 ng·g⁻¹·h⁻¹;可溶性碳配施氮处理下无肥土壤 N₂O 排放速率变化范围为-0.744~6.72 ng·g⁻¹·h⁻¹,化肥土壤 N₂O 排放速率变化范围为-0.291~2.65 ng·g⁻¹·h⁻¹,化肥+有机肥土壤 N₂O 排放速率变化范围为 0.272~9.12 ng·g⁻¹·h⁻¹。

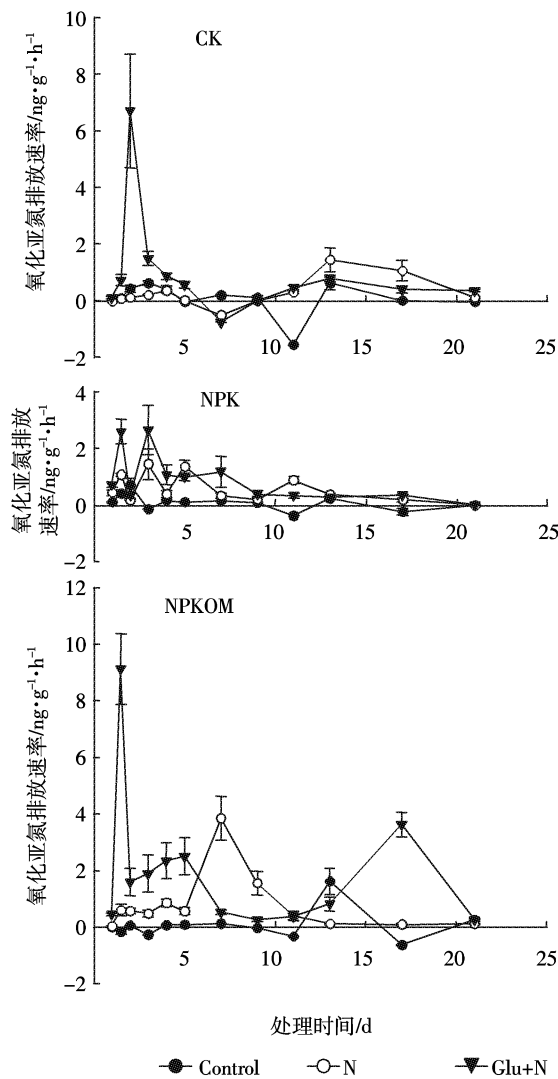


图 3 外加可溶性碳、氮后长期施肥黑土氧化亚氮排放速率

Figure 3 Emissions of nitrous oxide from black soil after addition of soluble C and N

2.2.2 黑土 N₂O 排放总量的变化

外加可溶性碳、氮后长期不同施肥黑土 N₂O 排放总量如图 4 所示。在单施氮肥处理下,黑土 N₂O 排放

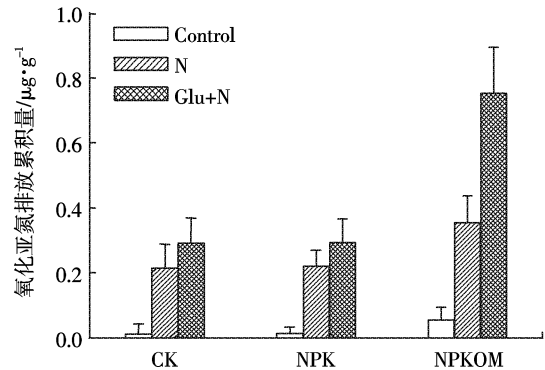


图 4 外加可溶性碳、氮后长期施肥黑土 N₂O 排放总量

Figure 4 Total amounts of nitrous oxide emissions from black soil after addition of soluble C and N

总量最高为化肥+有机肥土壤(0.355 μg·g⁻¹),与无肥土壤相比增加 65.1%,其次为化肥土壤(0.221 μg·g⁻¹),比无肥土壤增加 2.79%;在可溶性碳配施氮处理下,化肥土壤 N₂O 排放总量为 0.294 μg·g⁻¹,比无肥土壤 N₂O 排放总量增加 0.685%;化肥+有机肥土壤 N₂O 排放总量为 0.754 μg·g⁻¹,比无肥土壤 N₂O 排放总量增加 158%。同时,与单施氮肥处理相比,无肥土壤在添加可溶性碳后土壤 N₂O 排放总量增加 35.8%,化肥土壤增加 33.0%,化肥+有机肥土壤增加 112%。

2.3 外加可溶性碳、氮后长期施肥潮褐土 N₂O 排放变化

2.3.1 潮褐土 N₂O 排放速率的变化

由图 5 可知,单施氮肥和可溶性碳配施氮处理中,不同施肥土壤 N₂O 排放速率特征相似,总体呈现化肥土壤的 N₂O 排放速率峰值高于无肥土壤的趋势。在单施氮肥处理下,化肥土壤 N₂O 排放速率最大峰值出现在第 1.5 d,为 13.1 ng·g⁻¹·h⁻¹,而无肥土壤 N₂O 排放速率峰值则出现在第 5 d,为 11.9 ng·g⁻¹·h⁻¹;与此同时,在可溶性碳配施氮处理中,化肥土壤 N₂O 排放速率在试验处理第 2 d 达到峰值(86.2 ng·g⁻¹·h⁻¹),无肥土壤 N₂O 排放速率则在第 4 d 达到峰值(56.23 ng·g⁻¹·h⁻¹),随后迅速降低。

2.3.2 潮褐土 N₂O 排放总量的变化

图 6 显示,N₂O 排放总量因潮褐土长期施肥不同而产生明显差异($P < 0.05$)。在单施氮肥处理下,化肥土壤 N₂O 排放总量为 0.868 μg·g⁻¹,比无肥土壤高 42.8%;在可溶性碳配施氮处理下,化肥土壤 N₂O 排放总量为 3.07 μg·g⁻¹,比无肥土壤高 56.3%。同时,无肥土壤在可溶性碳配施氮处理下 N₂O 排放总量比在单施氮肥处理下 N₂O 排放总量增加 224%,而化肥土

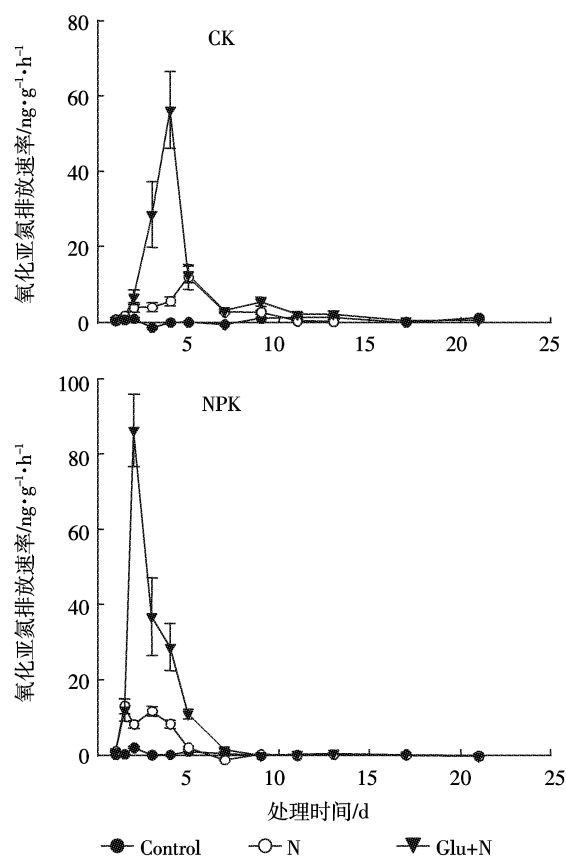


图5 外加可溶性碳、氮后长期施肥潮褐土 N_2O 排放速率
Figure 5 Emissions of nitrous oxide from cinnamon soil after addition of soluble C and N

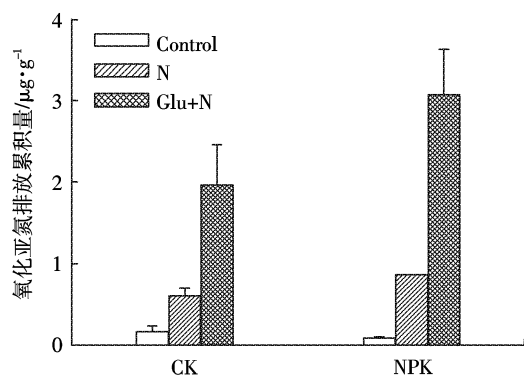


图6 外加可溶性碳、氮后长期施肥潮褐土 N_2O 排放总量
Figure 6 Total amounts of nitrous oxide emissions from cinnamon soil after addition of soluble C and N

壤在可溶性碳配施氮处理下 N_2O 排放总量比在单施氮肥处理下 N_2O 排放总量增加 254%。

2.4 外加可溶性碳、氮后长期施肥红壤 N_2O 排放变化

2.4.1 红壤 N_2O 排放速率的变化

外加可溶性碳、氮后红壤 N_2O 排放速率因长期施肥不同而呈现一定差异。由图 7 可知,在试验各处理

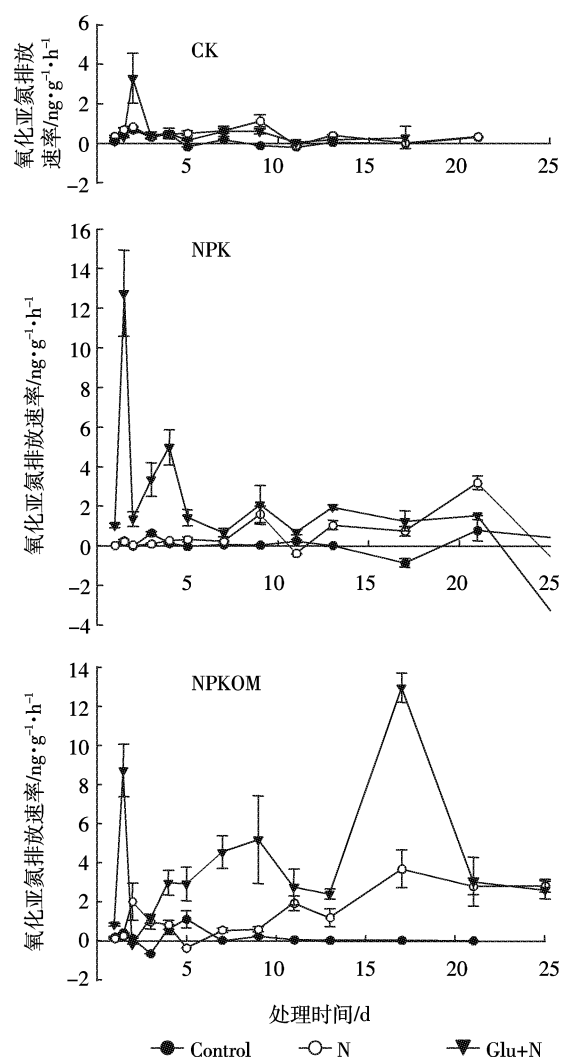


图7 外加可溶性碳、氮后长期施肥红壤 N_2O 排放速率
Figure 7 Emissions of nitrous oxide from red soil after addition of soluble C and N

下,土壤 N_2O 排放速率最大峰值的变化规律均为化肥+有机肥土壤 > 化肥土壤 > 无肥土壤。在单施氮肥处理下,化肥+有机肥土壤 N_2O 排放速率最大峰值最高,为 $3.68 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,无肥土壤 N_2O 排放速率最大峰值最低,仅为 $1.13 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$;在可溶性碳配施氮处理下,土壤 N_2O 排放最大峰值的变化规律与单施氮肥处理下的变化规律一致,最高是化肥+有机肥土壤 ($13.0 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$),其次是化肥土壤 ($12.8 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$),最低是无肥土壤 ($3.30 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)。且在单施氮肥和可溶性碳配施氮处理下,长期不同施肥土壤 N_2O 排放速率均呈现多峰态势。

2.4.2 红壤 N_2O 排放总量的变化

图 8 显示,在单施氮肥处理下,土壤 N_2O 排放总量最高为化肥+有机肥土壤 ($1.04 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$),其次为化

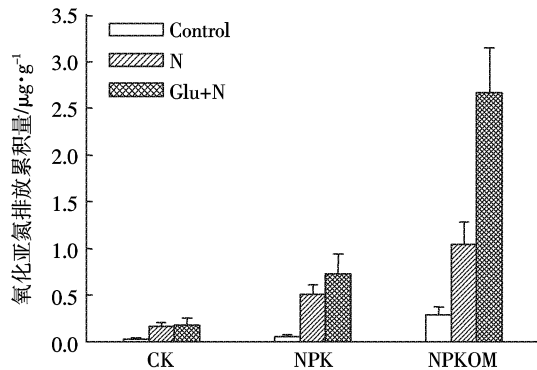
图 8 外加可溶性碳、氮后长期施肥红壤 N₂O 排放总量

Figure 8 Total amounts of nitrous oxide emissions from red soil after addition of soluble C and N

肥土壤 ($0.511 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), 最低为无肥土壤 ($0.171 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$); 在可溶性碳配施氮处理下, 土壤 N₂O 排放总量变化顺序与单施氮肥处理下的顺序一致, 但 N₂O 排放总量的值均显著高于单施氮肥处理 ($P<0.05$)。在可溶性碳配施氮处理下, 化肥土壤 N₂O 排放总量为 $0.731 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 比无肥土壤 N₂O 排放总量增加 308%; 化肥+有机肥土壤 N₂O 排放总量为 $2.67 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 比无肥土壤 N₂O 排放总量增加 1392%。同时, 与单施氮肥处理相比, 无肥土壤在添加可溶性碳后土壤 N₂O 排放总量增加 4.68%, 化肥土壤增加 43.0%, 化肥+有机肥土壤增加 156%。

2.5 外加可溶性碳、氮后土壤无机氮含量的变化

从表 2 中可以看出, 与试验开始时相比, 试验结束时土壤铵态氮含量显著降低, 而土壤硝态氮含量显著增加 ($P<0.05$)。在单施氮肥、可溶性碳配施氮处理下, 不同热量带土壤 (NPK) 铵态氮含量减少幅度最大为潮褐土 (95.1、93.8 个百分点), 其次为黑土 (84.6、

87.8 个百分点), 最小为红壤 (66.3、70.2 个百分点); 同时, 在单施氮肥、可溶性碳配施氮处理下, 潮褐土硝态氮增加量最大为 361、262 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 黑土增加量为 294、201 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 红壤增加量为 147、96.9 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 且单施氮肥处理土壤硝态氮增加量均显著高于可溶性碳配施氮处理 ($P<0.05$)。从表 2 还可得出, 在单施氮肥和可溶性碳配施氮处理下, 黑土、潮褐土和红壤长期施肥土壤在试验结束时土壤硝态氮增加量表现为化肥+有机肥土壤 > 化肥土壤 > 无肥土壤, 表明土壤硝态氮含量随土壤有机质含量的增加而增加。由此可知, 在单施氮肥和可溶性碳配施氮处理下, 潮褐土铵态氮的减少幅度和硝态氮的增加幅度均高于黑土和红壤。

3 讨论

土壤 pH 值主要通过影响硝化、反硝化细菌的活性进而影响 N₂O 的形成与排放。有研究表明^[14], 土壤硝化细菌对酸度很敏感, 其最适存活的 pH 值范围为 6.5~8.0; 反硝化细菌进行反硝化反应的最适 pH 值范围为 6~8 (也有人认为是 7~8)。Colbourn 等^[15]研究得出, 在纯培养和土壤中反硝化作用强度与 pH 值呈正相关, pH 值下降则反硝化强度减弱。在本研究中, 潮褐土 (NPK) pH 值为 8.09 (表 1), 土壤硝化细菌和反硝化细菌活性远高于 pH 值为 5.06 的黑土和 pH 值为 5.82 的红壤, 因而在试验处理下潮褐土排放的 N₂O 量显著高于黑土和红壤 ($P<0.05$)。

Burford 等^[16]发现反硝化速率与水溶性碳量呈极显著相关, 土壤中水溶性碳含量越多反硝化速率越快, 所产生的 N₂O 量也大大增加。Sánchez-Martín 等^[17]

表 2 外加可溶性碳、氮后土壤无机氮含量变化 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 2 Changes of mineral nitrogen content after the addition of soluble carbon and nitrogen ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Treatment		NH ₄ ⁺ -N						NO ₃ ⁻ -N					
		Day1			Day25			Day1			Day25		
		CK	NPK	NPKOM	CK	NPK	NPKOM	CK	NPK	NPKOM	CK	NPK	NPKOM
黑土	Control	41.8b	43.5b	44.0b	7.3c	8.0b	8.6a	8.6a	20.9a	10.7ab	26.3c	40.2c	78.0c
	N	211.4a	240.9a	268.8a	68.2a	37.1a	19.8a	10.8a	26.3a	11.6a	202.3a	320.4a	418.3a
	Glu+N	264.4a	278.7a	259.6a	43.9b	34.1a	21.5a	7.6a	15.0a	8.9b	148.2b	215.8b	308.2b
潮褐土	Control	30.3b	31.4c	—	7.4b	9.3b	—	20.5a	27.8a	—	42.5c	66.9c	—
	N	324.0a	384.3a	—	12.7ab	18.9a	—	18.2a	42.2a	—	391.5a	403.0a	—
	Glu+N	254.0a	351.7b	—	20.2a	21.9a	—	14.5a	29.6a	—	264.9b	291.5b	—
红壤	Control	27.7b	31.5c	37.2b	9.4c	12.2c	10.3b	9.1a	17.7a	15.5a	27.3a	36.4c	36.7c
	N	247.9a	249.0b	272.4a	177.6c	83.9a	99.4a	8.0a	18.0a	15.8a	26.8a	165.2a	181.6a
	Glu+N	241.8a	286.6a	294.8a	103.8b	85.5b	63.6a	7.5a	10.6a	6.1b	10.8b	161.2b	103.4b

注: 表中同列中相同的字母代表差异不显著, 不同的字母代表差异显著。

对苏格兰农田土壤在不同水分条件下施入可溶性碳氮后土壤 N_2O 排放的研究也表明,在 40% WFPS 土壤水分下可溶性碳促进土壤 N_2O 排放。本文研究结果表明,添加可溶性碳均促进土壤 N_2O 排放,这是因为可溶性碳的添加刺激了土壤微生物的呼吸作用,加快土壤氧的消耗,加速了土壤厌氧环境的形成,间接增强了土壤生物反硝化作用,同时本试验土壤水分为 65% 田间持水量的条件不足以使反硝化作用进行到产生 N_2 这一步^[18],所以其中间产物 N_2O 排放量增加。

有研究表明,反硝化能力和潜力均受不同的长期施肥的影响^[19]。董玉红等^[20]也认为长期不同施肥后形成的不同肥力的土壤是影响土壤 N_2O 排放的一个重要因素。本试验结果表明长期不同施肥土壤在单施氮肥和可溶性碳配施氮处理下,土壤 N_2O 排放量的变化规律均为化肥+有机肥土壤 > 化肥土壤 > 无肥土壤,且与无肥土壤相比,红壤的化肥土壤 N_2O 排放量增加了 254% (单施氮肥和可溶性碳配施氮处理下的平均值),潮褐土化肥土壤增加了 49.5%,黑土化肥土壤增加了 1.74%,表明在有效积温越高的土壤上长期施肥对土壤 N_2O 损失的贡献越大。

在 pH 值为 7.88 ~ 8.09 的潮褐土中,土壤硝化细菌活性强,促进了铵态氮向硝态氮转化,从而使得潮褐土铵态氮向硝态氮转化的幅度均高于黑土和红壤,增加了土壤氮素损失的潜能。Sánchez-Martín 等^[17]研究表明,与单施氮肥相比,添加可溶性碳后土壤硝态氮增加量显著减少,与本研究结果一致。这可能是因为添加可溶性碳增强了土壤生物反硝化作用,土壤中氮素通过反硝化作用以 N_2O 形式损失量大,从而使得 NO_3^- -N 含量减少。

4 结论

(1) 外加可溶性碳、氮后潮褐土 N_2O 排放量均显著高于黑土和红壤。在氮肥的基础上添加可溶性碳,显著增加了土壤 N_2O 排放量,且在潮褐土上的增加量显著高于黑土和红壤。

(2) 在长期不同施肥黑土、潮褐土和红壤中施用氮肥与可溶性碳配施氮后,土壤 N_2O 排放总量均表现为化肥+有机肥土壤 > 化肥土壤 > 无肥土壤。与单施氮肥相比,可溶性碳配施氮显著增加了土壤 N_2O 排放量,且在有效积温越高的土壤上长期施肥对土壤 N_2O 损失的贡献越大。

(3) 外加可溶性碳、氮后土壤中铵态氮含量在试验结束时显著低于试验开始时,而硝态氮含量在试验

结束时显著高于试验开始时。在单施氮肥和可溶性碳配施氮下,潮褐土铵态氮减少幅度和硝态氮增加幅度均高于黑土和红壤,且在不同施肥土壤中,添加可溶性碳后土壤硝态氮增加量显著减少。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing[R/OL], 2007.
- [2] Mosier A R, Schimel D S. Influence of agricultural nitrogen on atmospheric methane and nitrous oxide[J]. *Chem Ind*, 1991, 23: 874-877.
- [3] 蔡廷江, 王连峰, 温丽燕, 等. 培养实验研究长期不同施肥制度下中层黑土氧化亚氮的排放特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 617-621.
Cai Y J, Wang L F, Wen L Y, et al. Nitrous oxide emission from long-term fertilized black soil by laboratory incubation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2): 617-621.
- [4] Das P, Kim K H, Sa J H, et al. Emissions of ammonia and nitric oxide from an agricultural site following application of different synthetic fertilizers and manures[J]. *Geosciences Journal*, 2008, 12(2): 177-190.
- [5] 黄树辉, 蒋文伟, 吕 军, 等. 氮肥和磷肥对稻田 N_2O 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2005, 25(5): 540-543.
Huang S H, Jiang W W, Lv J, et al. Influence of nitrogen and phosphorus fertilizers on N_2O emissions in rice fields[J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(5): 540-543.
- [6] 焦 燕, 黄 耀, 宗良纲, 等. 氮肥水平对不同土壤 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2094-2098.
Jiao Y, Huang Y, Zong L G, et al. Impact of different levels of nitrogen fertilizer on N_2O emission from different soils[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(8): 2094-2098.
- [7] Daum D, Schenk M K. Influence of nutrient solution pH on N_2O and N_2 emissions from a soilless culture system[J]. *Plant and Soil*, 1998, 203: 279-287.
- [8] 彭佩钦, 仇少君, 童成立, 等. 长期施肥对水稻土耕层微生物生物量氮和有机氮组分的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(8): 1816-1821.
Peng P Q, Qiu S J, Dong C L, et al. Effects of long-term application of fertilizers on soil microbial biomass nitrogen and organic nitrogen components in subtropical paddy soils[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(8): 1816-1821.
- [9] Fan T L, Stewart B A, Wang Y, et al. Long-term fertilization effects on grain yield, water-use efficiency and soil fertility in the dryland of Loess Plateau in China[J]. *Agr Ecosyst Environ*, 2005, 106: 313-329.
- [10] Scheer C, Wassmann R, Kienzler K, et al. Nitrous oxide emissions from fertilized, irrigated cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in the Aral Sea Basin, Uzbekistan: Influence of nitrogen applications and irrigation practices [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40: 290-301.
- [11] Jones S K, Rees R M, Kosmas D, et al. Influence of organic and mineral N fertilizer on N_2O fluxes from a temperate grassland[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 121: 74-83.
- [12] 杨劲峰, 韩晓日, 战秀梅, 等. 不同施肥处理对棕壤 N_2O 排放量的影响[J]. 生态环境, 2007, 16(2): 560-563.

- Yang J F, Han X R, Zhan X M, et al. Effects of different fertilization on N₂O emission in brown field[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(2): 560–563.
- [13] Dick J, Skiba U, Wilson J. The effect of rainfall on NO and N₂O emissions from Ugandan agroforest soils[J]. *Phyton-Annales Rei Botanican*, 2001, 41: 73–80.
- [14] Yamulki S, Harrison R M, Goulding K W T, et al. N₂O, NO and NO₂ fluxes from a grassland: effect of soil pH[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, 29: 1199–1208.
- [15] Colbourn P. Denitrification and N₂O production in pasture soil: the influence of nitrogen supply and moisture [J]. *Agric Ecosyste Environ*, 1992, 39: 267–278.
- [16] Burford J R, Bremner J M. Relationships between the denitrification capacities of soils and total, water-soluble and readily decomposable soil organic matter[J]. *Soil Boil Biochem*, 1975, 7: 389–394.
- [17] Sánchez-Martín L, Vallejo A, Dick J, et al. The influence of soluble carbon and fertilizer nitrogen on nitric oxide and nitrous oxide emissions from two contrasting agricultural soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40: 142–151.
- [18] Azam F, Muller C, Weiske A, et al. Nitrification and denitrification as sources of atmospheric nitrous oxide—role of oxidizable carbon and applied nitrogen[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35: 54–61.
- [19] Simek M, Hopkins D W, Kalcik J. Biological and chemical properties of amble soils affected by long-term organic and inorganic fertilizer applications[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 29: 300–308.
- [20] 董玉红, 欧阳竹, 李 鹏, 等. 长期定位施肥对农田土壤温室气体排放的影响[J]. *土壤通报*, 2007, 38(1): 97–100.
- Dong Y H, Ouyang Z, Li P, et al. Influence of long-term fertilization on greenhouse gas fuxes from agricultural soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(1): 97–100.