

等氮量下不同分施次数对燥红壤 N₂O 排放的影响^①

方雅各¹, 解 钰², 王丽华³, 杨 霖¹, 赵伶茹¹, 赖倩倩¹, 田 伟¹, 孟 磊^{1*}

(1 海南大学热带农林学院, 海口 571100; 2 海南省农业科学院农业环境与土壤研究所, 海口 571100;

3 琼海市农业技术推广服务中心, 海南琼海 571400)

摘要:通过室内培养试验研究等氮量下不同施肥次数对 N₂O 排放的影响。试验设一次性施氮(S1, 将 200 mg/kg 氮肥一次性施入土壤), 二次分施(S2, 将 200 mg/kg 氮肥分两次平均施入土壤), 三次分施(S3, 将 200 mg/kg 氮肥分 80、60、60 mg/kg 3 次施入土壤)和空白(CK, 不施肥)4 个处理。培养在 65% 田间持水量, 30 °C 恒温箱中进行。结果表明, 氮肥施入显著促进土壤 N₂O 排放; 等施氮量下, 不同分施次数使土壤 pH 呈显著性差异, 而土壤 pH 的差异又影响了土壤 N₂O 累积排放量; 分施次数越多, 土壤酸化程度越强, N₂O 累积排放量越少。因此, 在等施氮量下, 要充分考虑土壤酸化、N₂O 排放、NO₃-N 积累以及施肥成本等, 确定合理分施次数。

关键词:燥红壤; N₂O 排放; 施肥次数; 硝化作用

中图分类号: S131; X511 文献标识码: A

氧化亚氮(N₂O)是一种重要的温室气体, 不但能导致全球变暖, 还能与臭氧层中的 O₃ 反应而破坏臭氧层^[1-2]。土壤是 N₂O 排放的主要源, 排放至大气中的 N₂O 最高有 90% 来自土壤^[3]。土壤 N₂O 主要产生于微生物主导的硝化与反硝化过程^[4], 影响土壤微生物活性的因素, 如土壤温度、水分、有机质含量、pH、Eh 及质地等, 相应影响土壤 N₂O 的产生与排放^[5-7]。

施肥是农业生产过程中必不可少的措施, 施肥能影响微生物活性^[8], 改变土壤 pH^[9-12]和容重, 施肥还能改变土壤的储水能力^[13]及有机质和土壤养分含量^[14]。土壤性质变化相应影响到土壤氮的转化和 N₂O 产生。范晓晖和朱兆良^[15]的研究表明, 农田土壤的硝化势与土壤 pH 呈极显著正相关。于克伟等^[16]研究发现, 土壤 pH 在 3.4~6.8 范围内, 硝化作用与土壤 pH 正相关, 而土壤硝化作用对 N₂O 产生有着重要的作用^[17]。因此, 土壤 pH 变化相应影响 N₂O 产生, 如黄耀等^[18]发现 N₂O 排放通量与 pH 呈正相关。

氮肥施用还直接增加了土壤 N₂O 生成的反应底物。化学氮肥施用对土壤 N₂O 排放有明显的促进作用^[19], 是农业土壤 N₂O 产生的最大贡献源^[20]。王重阳等^[21]的研究表明, 施氮玉米田和春小麦田 N₂O 排

放量分别是不施氮处理的 3.88 倍和 1.10 倍。土壤氮含量及形态也影响氮转化, 土壤充足的氮促进土壤硝化作用^[22], 而 NO₃-N 则不但促进反硝化速率, 还抑制或延迟 N₂O 还原为 N₂^[23]。研究表明, 土壤 N₂O 排放与 NO₃-N 含量呈正相关关系^[24-25]。

海南土壤保肥、供肥差, 热带作物又经年生长, 农业生产施肥频繁、用肥总量大, 尤其是氮肥。频繁施肥增加了劳动力投入及相应的生产成本。因此, 施肥时加大投肥量以降低劳动力投入在农业生产上时有出现。等量投肥下, 分施次数的差异是否会导致土壤性质的差异, 从而影响 N₂O 排放? 为回答这个问题, 本试验运用室内培养方法, 研究等氮量下, 分施次数对海南燥红壤土壤性质及 N₂O 排放的影响, 以为热带地区土壤氮肥合理配施以及 N₂O 减排提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自海南省乐东黎族自治县尖峰镇万钟实业有限公司种植园内(18°39'N, 108°47'E), 土壤为浅海沉积物发育的燥红壤。取表层 0~20 cm 土壤,

基金项目 国家自然科学基金项目(41661051、41261063) 2017 年海南省重大科技专项(ZDKJ2017002) 海南省自然科学基金项目(317070) 和海南省研究生创新科研课题项目(Hys2017-95)资助。

* 通讯作者(menglei94@sohu.com)

作者简介: 方雅各(1992—), 男, 安徽桐城人, 硕士研究生, 主要从事碳氮循环研究。E-mail: yagefangjacob@163.com

去除杂质,经自然风干,研磨过 2 mm 孔径筛,供培养用;另取部分土壤测定土壤基本性质。土壤基本理化性质如下:pH 7.17(水提)、有机质 6.84 g/kg、全氮 0.41 g/kg、有效磷 71.90 mg/kg、速效钾 98.06 mg/kg、容重 1.59 g/cm³、田间持水量 14.86%。

1.2 试验设计

试验设 4 个处理,分别为:空白(CK,不添加氮肥);一次施入(S1,将 200 mg/kg 氮一次性施入);

两次施入(S2,将 200 mg/kg 氮分两次施入,第一次施入 100 mg/kg,第一次施肥后 10 d 时再施入 100 mg/kg);三次施入(S3,将 200 mg/kg 氮分 3 次施入,第一次施入 80 mg/kg,第一次施肥后 10 d 时再施入 60 mg/kg,第二次施肥后 10 d 时再施入 60 mg/kg),每个处理重复 3 次。

1.3 培养试验操作过程

称取 100.00 g(以烘干土计)土装入 250 ml 锥形瓶中,用胶头滴管向瓶内均匀滴加相应数量蒸馏水,使土壤含水量达到田间持水量的 45%,预培养一周。预培养结束后,向 S1 处理中加入含 N 量 20 mg/ml 的尿素(分析纯)溶液 1 ml,折合加入 N 200 mg/kg 土;向 S2 处理中加入含 N 量 10 mg/ml 尿素(分析纯)溶液 1 ml,培养到第 10 天时,再加入含 N 量 10 mg/ml 尿素(分析纯)溶液 1 ml,每次折合加入 N 100 mg/kg 土。向 S3 处理加入含 N 量 8 mg/ml 尿素(分析纯)溶液 1 ml,折合加入 N 80 mg/kg 土,培养到第 10 天时,再加入含 N 量 6 mg/ml 尿素(分析纯)溶液 1 ml,折合加入 N 60 mg/kg 土,培养到第 20 天时再加入含 N 量 6 mg/ml 尿素(分析纯)溶液 1 ml,折合加入 N 60 mg/kg 土。然后调节土壤水分,使含水量达到 65% 田间持水量。将锥形瓶口用保鲜膜覆盖,膜上用针扎孔,然后将瓶子放在 30 °C 的恒温培养箱中进行培养,培养周期为 30 d。每处理设 6 个重复,其中 3 个重复用于 N₂O 排放通量测定,另 3 个重复用来测定矿质氮含量。每隔一天通过称重法补水,使土壤水分始终保持在 65% 田间持水量。

1.4 气体采样及测定方法

第一次加入氮肥后的第 1、2、4、6、8、10、11、13、15、17、19、20、21、23、25、27、30 天采集气体。气体采样时,向瓶内吹入数分钟高纯空气以驱除瓶内气体,随后迅速用硅胶塞塞住瓶口,并用 704 胶密封瓶口和塞子之间的空隙。在密封锥形瓶后 0 及 40 min 分别用 25 ml 注射器通过硅橡胶塞的中间取样口采集瓶中气体,直接注入气相色谱仪(岛津 GC-2014)测定气样中的 N₂O 浓度。

N₂O 排放通量的计算公式如下:

$$F = \rho \times \Delta C / \Delta t \times 273.15 / (273.15 + T) \times V / m \quad (1)$$

式中: F 为 N₂O 排放通量(N₂O-N, $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$); ρ 是标准状态下 N₂O 的密度(kg/m^3); $\Delta C/\Delta t$ 是锥形瓶内 N₂O 浓度变化率(N₂O-N, $10^{-9}/\text{h}$); V 是锥形瓶顶部空间体积(m^3); T 为环境气温($^{\circ}\text{C}$); m 是培养土烘干质量(kg)。

土壤 N₂O 累积排放量的计算公式如下:

$$M = F_1 \times 24 + \sum_{i=2}^n (F_i + F_{i-1}) / 2 \times (t_i - t_{i-1}) \times 24 \quad (2)$$

式中: M 为 N₂O 累积排放量(N₂O-N, $\mu\text{g}/\text{kg}$); F 为土壤 N₂O 排放通量(N₂O-N, $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$); t 为采样时间(d); i 为采样次数; n 为总测定次数; $t_i - t_{i-1}$ 为两次采样的间隔天数。

1.5 土壤采样及测定方法

土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 质量分数分别于加入尿素后的第 4、8、11、15、19、21、25、30 天测定。测定方法为:用 2 mol/L KCl 浸提土壤(液土比 5:1),滤液中的 NH₄⁺-N 采用靛酚蓝比色法(625 nm)进行测定,NO₃⁻-N 采用紫外双波长(220 nm 和 275 nm)分光光度法进行测定。

培养结束后,培养土基本理化性质的分析参考《土壤农业化学分析方法》^[26]进行,其中:土壤 pH 采用电位法(水土比 2.5:1)测定;有机碳采用重铬酸钾-硫酸消化法测定;总氮采用半微量凯氏定氮法测定;有效磷采用钼蓝比色法测定;速效钾采用 1 mol/L NH₄OAc 溶液(pH = 7)浸提,火焰光度计测定。

1.6 数据处理

利用 Microsoft Excel 2007 进行基础数据处理,方差分析利用 SPSS19.0 软件完成,处理间差异采用 Duncan 多重比较法,差异性水平为 0.05。

2 结果

2.1 分施次数对土壤理化性质的影响

等氮量下,分施次数造成土壤 pH、全氮含量、速效钾含量和 NO₃⁻-N 含量存在显著性差异(表 1)。相较于空白,施氮显著降低了土壤 pH,且不同分施氮次数的土壤 pH 之间存在显著差异,分施次数越多,土壤 pH 越低。全氮、速效钾和 NO₃⁻-N 含量变化与 pH 相反,分施次数越多,土壤全氮、速效钾和 NO₃⁻-N 含量越高。分施次数对土壤有机质、有效磷和 NH₄⁺-N 没有显著影响。

2.2 分施次数对土壤矿质氮质量分数的影响

氮施入后,各处理土壤 NH₄⁺-N 含量变化趋势大

表 1 培养结束后的土壤性质
Table 1 Soil characteristics after laboratory incubation study

处理	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	pH	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)	NH ₄ ⁺ -N (mg/kg)	NO ₃ ⁻ -N (mg/kg)
CK	3.49 ± 0.21 a	0.105 ± 0.013 d	7.07 ± 0.015 a	122.79 ± 23.95 a	127.39 ± 0.36 b	8.21 ± 0.245 a	19.16 ± 2.500 c
S1	3.63 ± 0.07 a	0.230 ± 0.042 c	6.01 ± 0.010 b	136.85 ± 35.74 a	125.24 ± 1.09 b	8.42 ± 0.678 a	102.58 ± 2.458 b
S2	3.43 ± 0.28 a	0.349 ± 0.003 b	5.74 ± 0.025 c	155.31 ± 0.84 a	112.62 ± 0.74 c	8.14 ± 0.300 a	128.53 ± 10.122 a
S3	3.67 ± 0.04 a	0.467 ± 0.038 a	5.21 ± 0.145 d	165.64 ± 20.84 a	133.19 ± .53 a	9.83 ± 1.656 a	136.61 ± 4.176 a

注：表中同一列数据小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

体一致，随培养时间延长整体呈下降趋势，但因施肥影响，每次施肥后 NH₄⁺-N 含量有一定程度提高，施肥量越大，增加幅度越大(图 1A)。

在培养的前段时间内是逐渐升高的，后期逐步稳定。施肥次数增加土壤 NO₃⁻-N 含量(图 1B)，如二次和三次分施的土壤 NO₃⁻-N 显著高于一次性施入的。

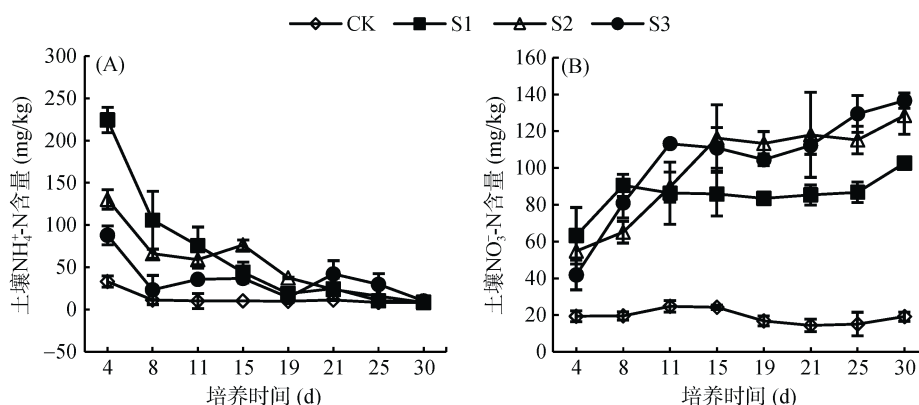


图 1 添加尿素后不同处理土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量的动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of NH₄⁺-N and NO₃⁻-N concentrations under different treatments after urea addition

2.3 分施次数对土壤 N₂O 排放影响

施肥后，各处理土壤 N₂O 排放通量短期内升高。施肥量越多，N₂O 排放通量峰值越高，N₂O 排放持续时间越长(图 2A)。施肥显著增加土壤 N₂O 累积排放量，等氮量下，分施次数越多，土壤 N₂O 累积排放量越小(图 2B)。一次性投入、两次投入和三次投入的土壤，N₂O 累积排放量分别为 1 019.24、787.84 和 547.62 μg/kg。二次投肥和三次投肥的土壤 N₂O 累积排放量比一次性投肥的土壤分别减少了 22.70%和 46.27%。

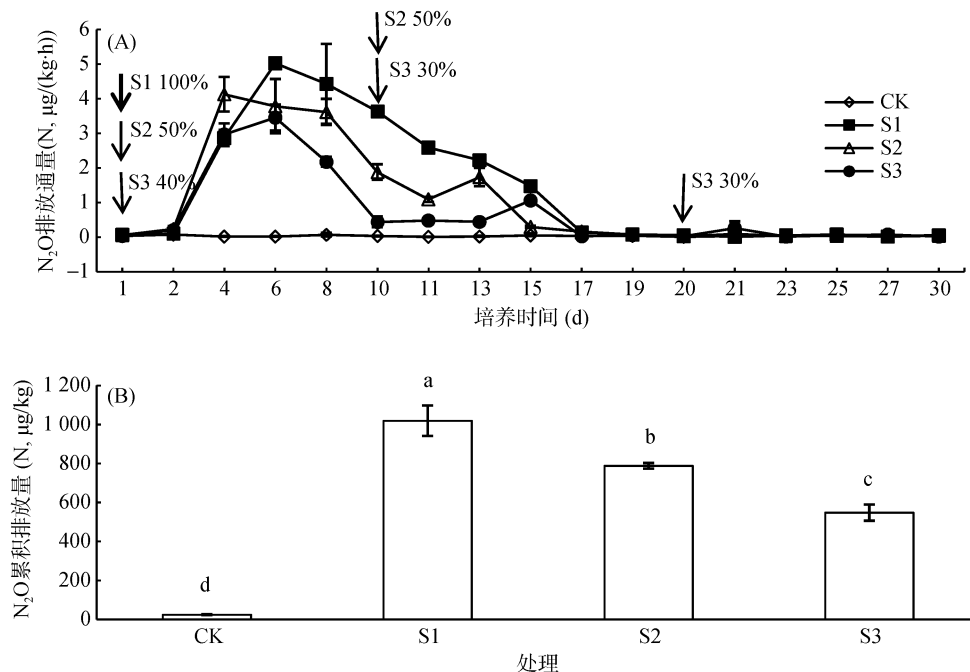
3 讨论

等氮量下，分施次数对土壤 pH、土壤全氮及 NO₃⁻-N 有显著影响(表 1)。施入到土壤中的尿素通过水解可以转为微生物硝化作用所需要的底物 NH₄⁺-N，硝化作用的产物 NO₃⁻-N 又成为微生物反硝化作用的底物，硝化和反硝化作用相互促进，增加 N₂O 排放^[27]。本研究中，培养开始时土壤 N₂O 排放量快速出现峰值，主要是氮肥施入土壤后为硝化过程提供反应底物矿质氮。施肥量越多，矿质氮含量越

高，硝化的底物越多，土壤 N₂O 峰值越高(图 2A)。

尿素氮施入土壤，其引起土壤酸化的机制是 NH₄⁺-N 的硝化作用^[28-31]。等氮量而不同分施次数造成土壤 pH 的显著差异，可能源于参与硝化作用的 NH₄⁺-N 的差异。施入的尿素水解成 NH₃，而 NH₃ 质子化过程中释放出 OH⁻ 提高土壤 pH。尿素投入越多，释放的 OH⁻ 越多，燥红土本身 pH 相对较高，由此可能加剧 NH₃ 挥发损失。投肥次数越少，挥发损失越多，剩余参与硝化的 NH₄⁺-N 量相对越少，则硝化对土壤酸化贡献越少，土壤 NO₃⁻-N 量也就可能越少(表 1)。

土壤 pH 是影响硝化作用的重要因素。Sahrawat^[32] 研究表明，硝化作用在 pH 为 3.14 ~ 8.16 范围内与 pH 存在显著正相关；陈文新^[33] 研究发现，土壤 pH 从 3.4 增加到 8.6，土壤 N₂O 累积排放量会随土壤 pH 增加而增加。燥红壤土质较轻，通气性好，反硝化作用弱，硝化作用是土壤中 N₂O 排放的主要途径^[34]。等氮量下，不同施肥次数导致土壤酸化程度存在显著性差异(表 1)，一次性投入的土壤酸化程度弱于二次投入的，二次投入的又弱于三次投入，因此出现了随着土壤 pH 的下降，N₂O 的累积排放量越小，即土壤



(图中小写字母不同表示处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平)

图 2 添加尿素后不同处理 N_2O 的排放通量和累积排放量

Fig. 2 Emission rates and cumulative emissions of N_2O under different treatments after urea addition

N_2O 排放总量为一次性投肥 > 二次投肥 > 三次投肥这样的结果。分施次数越多, 土壤 $NO_3^- - N$ 含量积累量越大 (表 1)。对于燥红壤等保肥能力较弱的热带土壤而言, 增大了 $NO_3^- - N$ 淋出土壤的风险。热带地区土壤多为酸性, 保肥性能差, 农业生产上多采用少量多次的施肥方式。结合本文结果分析, 该方式可加剧土壤酸化。反之, 集中施肥能适当减缓土壤酸化, 但加剧了 N_2O 的排放。因此, 要确定合理的分施次数, 需综合考虑土壤酸化、 N_2O 排放、 $NO_3^- - N$ 累积以及施肥的人力成本等因素。

4 结论

氮肥施入显著促进土壤 N_2O 排放。等施氮量下, 不同分施次数使土壤 pH 呈显著性差异, 而土壤 pH 差异又影响了土壤 N_2O 累积排放量。分施次数越多, 土壤酸化程度越强, N_2O 累积排放量越少。因此, 在等施氮量下, 要充分考虑到土壤酸化、 N_2O 排放、 $NO_3^- - N$ 积累以及施肥成本等, 确定合理分施次数。

参考文献:

[1] 毛向荣, 徐航, 周亚明. 一氧化二氮的来源与控制[J]. 上海化工, 2016, 41(11): 21-25
 [2] 方华军, 程淑兰, 于贵瑞, 等. 森林土壤氧化亚氮排放对大气氮沉降增加的响应研究进展[J]. 土壤学报, 2015, 52(2): 262-271

[3] 杨兰芳, 蔡祖聪, 祁士华. 大豆和玉米生长对土壤 N_2O 排放的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(5): 861-865
 [4] 李新华, 朱振林, 董红云, 等. 氮肥减施对黄淮海地区麦田温室气体排放的影响[J]. 土壤与作物, 2016, 5(4): 215-222
 [5] 温慧洋, 焦燕, 杨铭德, 等. 不同盐碱程度土壤氧化亚氮(N_2O)排放途径的研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(10): 2026-2033
 [6] 李英臣, 王奇博, 侯翠翠, 等. 玉米秸秆不同构件添加对土壤 N_2O 排放的影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 260-264
 [7] Smith K A, Ball T, Conen F, et al. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: Interaction of soil physical factors and biological processes[J]. European Journal of Soil Science, 2003, 54(4): 779-791
 [8] 邢鹏飞, 武晓森, 高圣超, 等. 不同施肥处理对玉米-小麦轮作土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 微生物学杂志, 2016, 36(1): 22-29
 [9] 孟红旗, 刘景, 徐明岗, 等. 长期施肥下我国典型农田耕层土壤的 pH 演变[J]. 土壤学报, 2013, 50(6): 1109-1116
 [10] Högberg P, Fan H B, Quist M E, et al. Tree growth and soil acidification in response to 30 years of experimental nitrogen loading on boreal forest[J]. Global Change Biology, 2006, 12(3): 489-499
 [11] Liu K H, Fang Y T, Yu F M, et al. Soil acidification in response to acid deposition in three subtropical forests of subtropical China[J]. Pedosphere, 2010, 20(3): 399-408

- [12] 孙云保, 张民, 郑文魁, 等. 控释氮肥对小麦-玉米轮作产量和土壤养分状况的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 115-121
- [13] 杨何宝, 李继泉, 王俊娟, 等. 施肥和苜蓿接种根瘤菌对苜蓿生长及铁尾矿砂基质理化性质的影响[J]. 草业学报, 2016, 25(2): 68-76
- [14] 王健波, 张斐斐, 周婧, 等. 绿肥与施氮量对土壤理化性质的影响[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2012, 30(1): 84-88
- [15] 范晓辉, 朱兆良. 我国几种农田土壤硝化势的研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(2): 124-125
- [16] 于克伟, 陈冠雄, Struwe S, 等. 农田和森林土壤中氧化亚氮的产生与还原[J]. 应用生态学报, 2000, 11(3): 385-389
- [17] 朱永官, 王晓辉, 杨小茹, 等. 农田土壤 N₂O 产生的关键微生物过程及减排措施[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 792-800
- [18] 黄耀, 焦燕, 宗良纲, 等. 土壤理化特性对麦田 N₂O 排放影响的研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(5): 598-602
- [19] 王磊, 程淑兰, 方华军, 等. 外源性 NH₄⁺和 NO₃⁻输入对亚热带人工林土壤 N₂O 排放的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 724-734
- [20] 徐玉秀, 郭李萍, 谢立勇, 等. 中国主要旱地农田 N₂O 背景排放量及排放系数特点[J]. 中国农业科学, 2016, 49(9): 1729-1743
- [21] 王重阳, 郑靖, 顾江新, 等. 下辽河平原几种旱作农田 N₂O 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
- [22] Chiu C Y, Lee S C, Chen T H, et al. Denitrification associated N loss in mangrove soil[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2004, 69(3): 185-189
- [23] Mulvaney R L, Khan S, Mulvaney C S. Nitrogen fertilizers promote denitrification[J]. Biology and Fertility of Soils, 1997, 24(2): 211-220
- [24] 杨苗. 施氮对桉树林生长季土壤养分动态及温室气体通量的影响[D]. 河南焦作: 河南理工大学, 2015: 29-44
- [25] 马钢, 王平, 王冬雪, 等. 高寒灌丛土壤温室气体释放对添加不同形态氮素的响应[J]. 草业学报, 2015, 24(3): 20-29
- [26] 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, 2000: 13-195
- [27] Skiba U, Smith K A. The control of nitrous oxide emissions from agricultural and natural soils[J]. Chemosphere-Global Change Science, 2000, 2(3): 379-386
- [28] 刘源, 钱薇, 徐仁扣. 双氰胺对施氮肥引起的红壤酸化的抑制作用[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(1): 76-80
- [29] 王峰, 陈玉真, 尤志明, 等. 不同施氮量对两种茶园土壤硝化作用和 pH 值的影响[J]. 茶叶科学, 2015, 35(1): 82-90
- [30] 佟德利, 徐仁扣, 顾天夏. 施用尿素和硫酸铵对红壤硝化和酸化作用的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(4): 404-409
- [31] 徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(2): 238-244
- [32] Sahrawat K L. Nitrification in some tropic soils[J]. Plant and Soil, 1982, 65(2): 281-286
- [33] 陈文新. 土壤环境微生物学[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1989: 133-151
- [34] 胡俊鹏, 潘凤娥, 王小淇, 等. 秸秆及生物炭添加对燥红壤 N₂O 排放的影响[J]. 热带作物学, 2016, 37(4): 784-789

Effects of Different Nitrogen Application Times on N₂O Emission in Dry Red Soil

FANG Yage¹, XIE Yu², WANG Lihua³, YANG Lin¹, ZHAO Lingru¹,
LAI Qianqian¹, TIAN Wei¹, MENG Lei^{1*}

(1 *Institute of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou 571100, China;*

2 *Institute of Agro-Environment and Soil, Hainan Academy of Agricultural Sciences, Haikou 571100, China;*

3 *Qionghai Agro-technical Extension Center, Qionghai, Hainan 571400, China)*

Abstract: An indoor incubation under 30 °C and 65% water holding capacity was conducted to study how different split applications, in the circumstances of equal nitrogen amount, respectively affected N₂O emission. Four treatments were designed, including one-time application (S1, 200 mg/kg nitrogen fertilizer was applied to the soil at one time), two separate applications (S2, 200 mg/kg nitrogen fertilizer equally distributed into the soil), three separate applications (S3, 200 mg/kg nitrogen fertilizer was divided into three different times: 80, 60 and 60 mg/kg), and control (CK, no fertilization). The results showed that the application of nitrogen fertilizer significantly promoted N₂O emission in soil. Under the same nitrogen application rate, different application times significantly resulted in differences of soil pH, which would further affect the N₂O accumulation emission. The more times of applications, the greater the degree of soil acidification, so the less cumulated amount of N₂O emissions. Therefore, under the condition of the same amount of nitrogen, soil acidification, N₂O emissions, nitrate nitrogen accumulation and fertilizer costs should be comprehensively considered in determining the reasonable split applications.

Key words: Dry red soil; N₂O emission; Fertilization times; Nitrification