文章编号: 1674 − 7054(2020)03 − 0331 − 10

施肥模式对菠萝产量及农田氧化亚氮排放的影响

符春敏[1], 尹黎燕[1], 邓　燕[2], 兰超杰[2], 韩忠钰[2], 金　鑫[2], 李长江[2], 黄家权[2]
(1. 海南大学 生命科学与药学学院, 海口 570228; 2. 海南大学 热带作物学院/海南省
热带生物资源可持续利用重点实验室, 海口 570228)

摘　要: 为探究不同施肥模式下菠萝(*Ananas comosus*)种植地土壤氧化亚氮(N_2O)的排放特征, 筛选出既高产又减少 N_2O 排放的施肥方法。本试验以热带地区菠萝农田为研究对象, 设置不施肥(CK)、常规施肥(NPK)、减量单施化肥(INF)、无机肥+有机肥配施(INF+M)、无机肥+有机肥+缓控肥配施(INF+M+S)等 5 个处理, 利用静态暗箱−气相色谱法对菠萝整个生育期土壤的 N_2O 排放特征进行监测, 并分析不同施肥模式下土壤温度、土壤含水量、硝态氮和铵态氮对 N_2O 排放的影响及菠萝产量间的差异。结果表明: INF+M+S, INF+M 和 INF 处理下的菠萝产量比 NPK 处理的分别增加 16.77%、6.66% 和 6.53%, 且 INF+M+S 显著高于 NPK。整个菠萝生育期, N_2O 累积排放量和平均通量表现为 NPK>INF>INF+M>INF+M+S>CK,且处理间差异显著; N_2O 排放强度依次为 NPK>INF>INF+M>INF+M+S>CK, 处理间也表现出显著差异; 同时, INF+M+S 处理的排放系数也显著低于其他施肥处理; 相关性分析发现, 土壤硝态氮和铵态氮含量与 N_2O 排放通量呈极显著正相关。INF+M+S 处理能够显著提高菠萝产量, 降低菠萝整个生育期农田 N_2O 的排放量与排放强度, 可作为菠萝较优的施肥模式。

关键词: 菠萝; 热带地区; 施肥模式; 氧化亚氮排放; 产量
中图分类号: S 506.2;S 668.3　　**文献标志码:** A　　DOI: 10.15886/j.cnki.rdswxb.2020.03.011

温室气体排放增加导致的全球变暖, 已引起国际社会的广泛关注, 而氧化亚氮(N_2O)作为重要的温室气体之一, 在 1750—2011 年间其含量增加了 20%, 且 N_2O 在百年尺度的全球增温趋势是 CO_2 的 298 倍[1]。研究发现, 大气中 60% 的 N_2O 来源于农业活动, 并仍以每年 0.3% 的速度增加[2], 而土壤本身的理化特性(土壤物理化学性质和微生物结构)、栽培管理因素(农业措施和作物类型)、肥料种类、施氮量和环境因子(土壤水分、温度、光照和 pH)等多种因素的改变, 都会导致农业 N_2O 排放发生变化[3]。在众多影响因素中, N_2O 排放量主要受施肥量与施肥种类的影响, 尤其是氮肥[4]。氮肥过量不仅导致氮素在土壤中大量的残留以及淋失[5], 同时也会显著增加 N_2O 的排放与其他气态氮的损失[6]。郭晨等[7] 的研究发现, 减氮 21.4% 能降低 N_2O 的排放, 而对作物产量没有显著影响; 同样, 在等氮量施肥条件下, 施用有机肥较无机肥能减少土壤 N_2O 的排放, 对作物产量也没有明显影响[8]; 但也有研究发现, 无机肥+有机肥配施处理与单施无机肥处理的 N_2O 排放相比无显著性差异或高于无机肥处理[8]。目前, 缓控释肥因其具有养分释放缓慢、周期长且利用效率高和减少氮素损失等优点而被逐渐应用于农田作物生产[9]。研究发现, 缓控释肥较常规施肥能提高小麦 (*Triticum aestivum* L.)、水稻 (*Oryza sativa*) 等作物的产量且能降低农田 N_2O 的排放[10]。在配施缓控释肥方面, 有研究表明, 缓控释肥+无机肥配施也能降低 N_2O 排放和增加产量[11]; 同时, 田伟等[8] 研究也表明, 无机肥+有机肥+缓控释肥配施处理能够显著降低 N_2O 的排放。可见,

收稿日期: 2020 − 03 − 17　　**修回日期:** 2020 − 04 − 15
基金项目: 2019 年海南省基础与应用基础研究计划(自然科学领域)高层次人才项目基金(2019RC108); 国家自然科学基金项目(31860130); 海南大学科研启动基金项目 (KYQD(ZR)1850)
第一作者: 符春敏(1996−), 女, 海南大学生命科学与药学学院 2017 年级硕士研究生. E-mail: 2764901364@qq.com
通信作者: 李长江(1989−), 男, 博士, 讲师. 研究方向: 作物高产高效栽培与低碳农作. E-mail: lichangjiang99@163.com; 黄家权(1976−), 男, 博士, 教授. 研究方向: 作物遗传育种. E-mail: jqhuang@163.com

降低施肥量和有机肥、缓控释肥并与化肥配施对减少农田 N_2O 排放及提高作物产量有重要意义。

我国是世界菠萝 (*Ananas comosus*) 十大生产国之一，现种植面积约 6 万 hm^2，主要分布于我国华南地区[12]。为了追求高产，果农在菠萝种植过程中施肥过量、施肥时间不合理等问题突出，不仅造成了肥料利用率低下，而且土壤中养分淋失严重，温室气体排放增加[13]，严重影响了我国菠萝产区的生态环境及人体健康。迄今，关于菠萝种植过程中施肥管理的研究，主要集中于常规化学肥料使用量及施用方式上[14]，而基于菠萝生长发育规律进行科学优化施肥，且进行有机肥和缓控释肥替代的施肥模式研究较少；另外，关于菠萝农田施肥管理对 N_2O 排放的影响尚未见有报道。因此，笔者以热带地区菠萝田为研究对象，在常规施肥量的基础上进行优化施肥，通过有机肥和缓控释肥进行替代，探讨不同施肥模式下农田 N_2O 排放的差异，并结合菠萝产量，筛选较优的施肥模式，旨在为热带地区菠萝的科学施肥提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况 本试验地位于海南省乐东县尖峰镇海南大学热带作物学院基地（东经 108°46′22″，北纬 18°39′6″），属于热带季风气候，年均气温 24 ~ 25 ℃，年均降雨量 1 279.10 mm，年蒸发量约为年降雨量的 2.0 ~ 2.5 倍。前茬作物为香蕉，试验地土壤为燥红土，pH6.05，耕层土壤（0 ~ 20 cm）含有机质 0.53%、铵态氮 0.34 $mg·kg^{-1}$、硝态氮 0.76 $mg·kg^{-1}$、有效磷 80.17 $mg·kg^{-1}$、速效钾 92.84 $mg·kg^{-1}$、全氮 0.37 $g·kg^{-1}$、全磷 0.37 $g·kg^{-1}$。试验期间，气温与降雨量等资料采用海南省乐东尖峰岭万钟公司区域自动站（M1601）气象站的数据（图 1）。

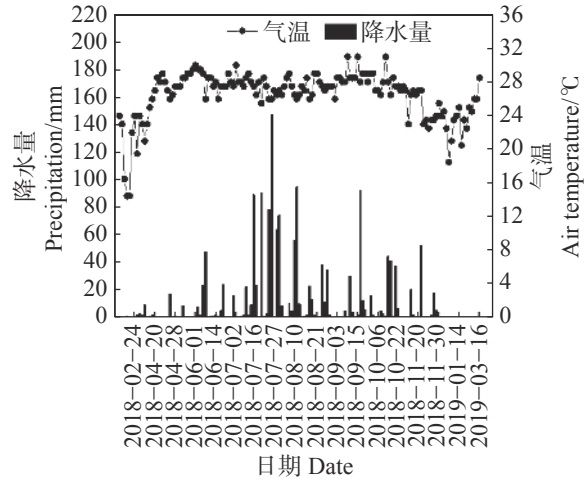

图 1 菠萝生育期的日平均气温与日降雨量

Fig. 1 Mean daily temperature and daily precipitation during the pineapple growing Seasons

1.2 试验设计 本试验共设 5 个处理：空白对照（不施肥，CK）、常规施肥（NPK）、减量单施化肥（INF，优化施肥处理）、有机无机配施（INF+M，优化施肥基础上，有机肥（羊粪）替代 20% 氮肥）、有机无机缓控配施 [INF+M+S，优化施肥基础上，有机肥替代 20% 氮肥+缓控释肥（包膜尿素）替代 15% 氮肥]。具体施肥方案见表 1（以纯养分计）。

表 1 试验地菠萝施肥方案

Tab. 1 Fertilization scheme

$kg·hm^{-2}$

处理 Treatment	菠萝生长期间施肥（基肥+追肥+追肥+追肥+追肥+追肥）情况 Pineapple growth stage (basal fertilizer+top dressing+top dressing+top dressing+top dressing+top dressing)				
	N	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO
CK	—	—	—	—	—
NPK	299+193+151+37+60+77	102+78+68+15+48+25	222+174+140+95+120+194	329	73
INF	172+111+91+22+35+45	23+19+17+4+19+12	138+109+89+59+117+120	132	87
INF+M	172（20%有机肥提供）+111+91+22+35+45	23+19+17+4+19+12	138+109+89+59+117+120	132	87
INF+M+S	172（20%有机肥、15%缓控释肥提供）+111+91+22+35+45	23+19+17+4+19+12	138+109+89+59+117+120	132	87

注：“—”表示未施肥；括号内为有机肥（羊粪）和缓控释肥（包膜尿素）提供的养分量比例。

Notes: “—” indicates no fertilization; the brackets indicate proportion of nutrients provided by organic fertilizer (goat manure) and controlled release fertilizer (coated urea).

试验采用随机区组设计，每个处理 3 个重复，共 15 个小区，每个小区 97.5 m^2（15 m×6.5 m）。采用起垄方式种植菠萝，垄上覆膜，沟内不覆膜，其中，垄高 20 cm，宽 90 cm，沟宽 50 cm；垄上菠萝行距 50 cm，

株距 35 cm。菠萝供试品种为澳大利亚‘卡因’(地区常规种植品种)。定植前将基肥撒施后旋耕入土, 菠萝生长周期较长, 整个观测期共施肥 6 次, 2018−01−22 施基肥, 2018−01−23 选大苗进行定植, 2019−03−10 收获。其他田间管理措施与当地大田管理方式一致。

1.3　样品的采集与测定　气体样品的采集使用不锈钢静态箱法, 采样箱横截面积为 0.5 m×0.5 m, 高 0.8 m, 箱外包 1 层海绵并覆盖铝箔, 以减小采样期间由于太阳辐射造成的箱内温度变化。将带凹槽的底座水平嵌于垄上, 底座内有 1 株菠萝, 采样时把采样箱罩在底座上, 连接好采气针筒和温度计, 并加水密封, 于关箱后 0, 15, 30 min 用带有三通阀的 50 mL 医用针筒采集气体, 先抽推针筒 4 ~ 5 次, 以混匀箱内气体, 然后采集气样 50 mL。

因菠萝种植后有 3 个月左右的缓苗阶段, 菠萝生长非常缓慢, 对土壤养分和水分吸收很少, 因此, 在菠萝移栽后首先每月采气 1 次, 从第 4 个月菠萝缓慢生长期开始平均采气频率为每 7 天 1 次, 在施肥后增加采样频率, 平均约每隔 2 天 1 次, 采气时间为上午的 9:00 ~ 11:00。为了更准确地估算 N_2O 的排放总量, 采集的气样带回实验室用气相色谱仪(岛津 GC-2014) 分析, N_2O 检测器为 ECD, 载气为氩甲烷, 检测器温度为 300 ℃。标准气体由中国计量科学研究院提供。

田间气体采集的同时, 用温度计同步测定箱内温度, 用土壤温湿度计(顺科达, TR-6D)测定 3 cm 和 7 cm 土层温度。另外, 每隔 2 周各小区采集 1 次土壤样品(0 ~ 20 cm)用于土壤含水量、铵态氮含量(NH_4^+-N)和硝态氮含量(NO_3^--N)的测定。土壤含水量采用烘干法测定, NH_4^+-N 和 NO_3^--N 采用鲜土样品, 用 2 mol·L^{-1}KCl 浸提(液土比 5∶1), 并用连续流动分析仪 (Alliance-Futura/Proxima, 法国产) 测定。

N_2O 排放通量计算公式:

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

式中, F 为 N_2O-N 排放通量(μg·m^{-2}·h^{-1}), ρ 为标准状态下 N_2O-N 的密度, 为 1.25 g·L^{-1}; V 为采气箱的体积(m^3); A 为采气箱所覆盖的土壤表面积(m^2); $\Delta c/\Delta t$ 为 N_2O 的排放速率; T 为采集气体时采气箱内的平均温度(℃)。

N_2O 排放强度: 指形成单位经济产量 N_2O 排放量, 即 N_2O 排放总量与作物产量的比值。N_2O 排放系数: 指施肥处理 N_2O 排放总量与对照不施肥 N_2O 排放总量之差与肥料投入量的比值。N_2O(菠萝)累计排放量 E_c(kg·hm^{-2})计算公式:

$$Ec=\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{F_i+F_{i+1}}{2}\right)\times(t_{i+1}-t_i)\times 24,$$

式中, n 为生长期间观测次数; F_i 和 F_{i+1} 为第 i 次和第 i+1 次采气时, N_2O 的排放通量(μg·m^{-2}·h^{-1}); $t_{i+1}-t_i$ 表示第 i+1 次和第 i 次采样的时间间隔 (d)。

1.4　数据处理　采用 Microsoft Excel 2016 进行数据整理, 利用 SPSS 20.0 软件进行不同处理间的差异显著性检验 (ANOVA 程序单因素方差分析, 5% 显著水平) 及 N_2O 排放通量和各影响因素间的相关性和偏相关关系采用 Duncan 多重比较方法进行分析; 用 OriginPro9.1 软件绘图。

2　结果与分析

2.1　不同施肥处理对土壤温度及土壤含水量的影响　从图 1 可知, 在菠萝生育期内降水分散且不均匀, 7 ~ 8 月降雨量较大且较频繁。从图 2 可知, 土壤含水量总体随降水的变化而变化。生长期间各处理平均土壤含水量表现为 CK>INF+M+S>INF+M>INF>NPK, 除 NPK 处理显著低于 CK, 其余处理相比 CK 和 NPK 处理无显著性差异。由图 3 可知, 整个菠萝生育期各处理 3 cm 和 7 cm 土层温度变化规律一致, 整体呈现先上升后下降的趋势, 3 cm 和 7 cm 土壤温度均表现 5 月最高, 12 月最低。3 cm 土壤温度和 7 cm 土壤温度总体表现分别为 CK>INF>INF+M>NPK>INF+M+S 和 CK>INF+M>INF>INF+M+S>NPK, 但各处理间温度均没有显著性差异。

2.2 不同施肥处理对土壤硝态氮和铵态氮含量的影响 由图 4 可知，在整个生育期内，各处理硝态氮、铵态氮含量表现出相似的变化规律，均出现 4 次高峰，并且都发生在施肥后，其他时间保持较小范围内。所有处理的土壤硝态氮含量介于 0.36 ~ 82.83 mg·kg^{-1} 之间，在菠萝生长的中期，NPK 处理土壤硝态氮含量显著高于其他施肥处理，CK 处理最低；而在菠萝生长后期，NPK 处理则表现出低于其他施肥处理或没有显著性差异。从整个菠萝生育期的平均硝态氮含量来看，NPK、INF、INF+M 和 INF+M+S 处理分别为 33.5, 24.73, 17.68 和 29.16 mg·kg^{-1}，且 INF+M 显著低于 NPK。同样，所有处理的土壤铵态氮含量介于 1.66 ~ 60.86 mg·kg^{-1} 之间，在菠萝生长的中期，NPK 处理铵态氮含量也显著高于其他施肥处理；而在菠萝生长后期，NPK 处理低于其他施肥处理或没有显著性差异。整个菠萝生育期铵态氮的平均含量依次为 NPK>INF+M+S>INF>INF+M，且在菠萝生育中期铵态氮的平均含量表现为 INF 和 INF+M 显著低于 NPK。

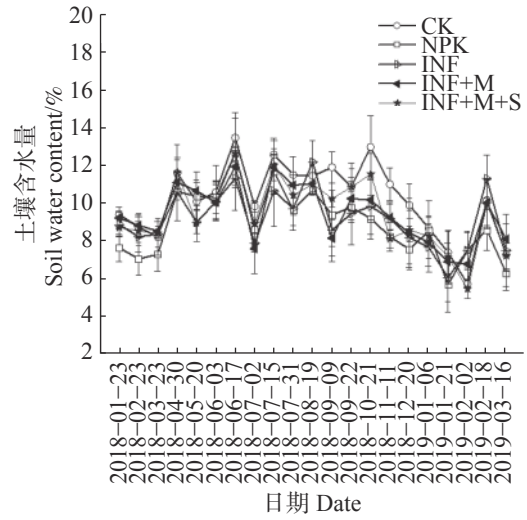

图 2 不同处理下 0 ~ 20 cm 土层土壤含水量的动态变化

Fig. 2 The dynamic change of soil water content in 0−20 cm soil layer under different treatments

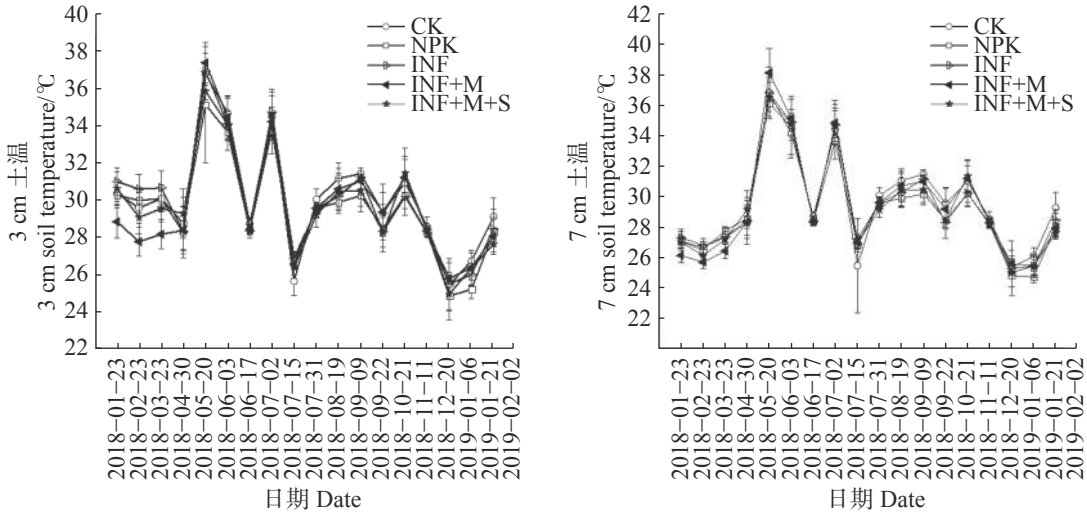

图 3 不同处理土壤温度的动态变化

Fig. 3 The dynamic change of soil temperature under different treatments

2.3 不同施肥处理对土壤 N_2O 排放通量的影响 由图 5 可知，在整个生育期内，各施肥处理菠萝田土壤 N_2O 排放通量表现出相似的变化规律，出现 6 次 N_2O 排放高峰，并且都发生在施肥后，其他时间保持较小的排放通量。在整个菠萝生育期间 N_2O 的排放通量变化范围为 1.2 ~ 85.6 μg·m^{-2}·h^{-1}，其中以 NPK 处理最高，达 85.56 μg·m^{-2}·h^{-1}；其次为 INF 和 INF+M 处理，其与 NPK 处理无显著差异；INF+M+S 处理低于其他施肥处理，且显著低于 NPK 处理。

2.4 不同施肥处理对土壤 N_2O 累计排放量的影响 如图 6 所示，各处理 N_2O 累积排放量高低顺序为：NPK>INF>INF+M>INF+M+S>CK，从大到小分别为 3.37, 2.68, 2.15, 1.84, 0.78 kg·hm^{-2}，且各处理间差异显著，其中 NPK 处理 N_2O 累积排放量最高。INF+M+S、INF+M 和 INF 处理相比 NPK 处理 N_2O 累积排放量分别显著减少了 45.40%, 36.20% 和 20.47%。NPK、INF、INF+M、INF+M+S 各处理 5 个时间段 N_2O 累积排放量大小依次为：2018 年 1 月至 2018 年 3 月>2018 年 4 月至 2018 年 6 月>2018 年 7 月至

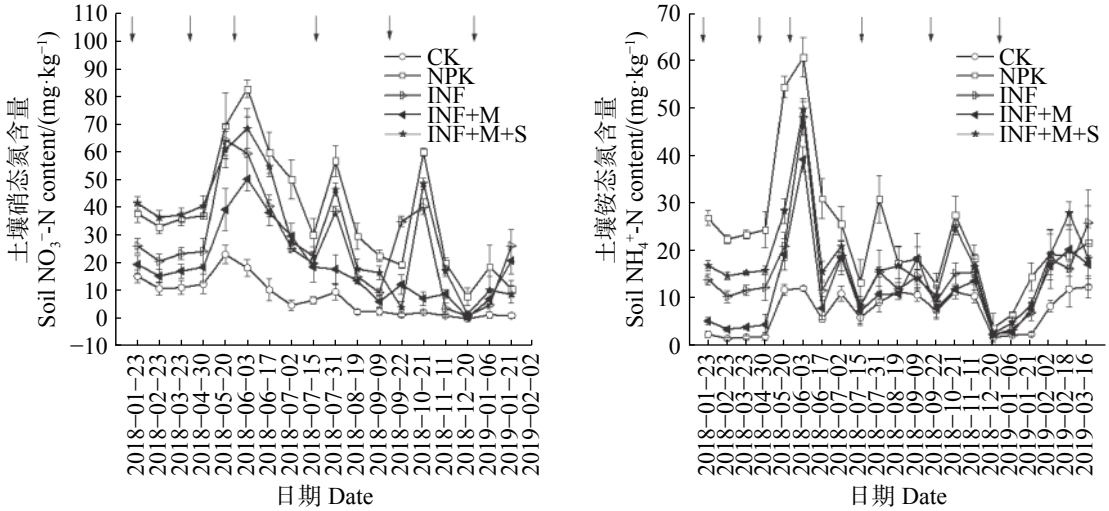

图 4　不同处理土壤硝态氮和铵态氮含量的动态变化

箭头代表施肥时间

Fig. 4　The dynamic change of soil nitrate nitrogen and ammonium nitrogen contents under different treatments

Arrow represents the date of fertilization

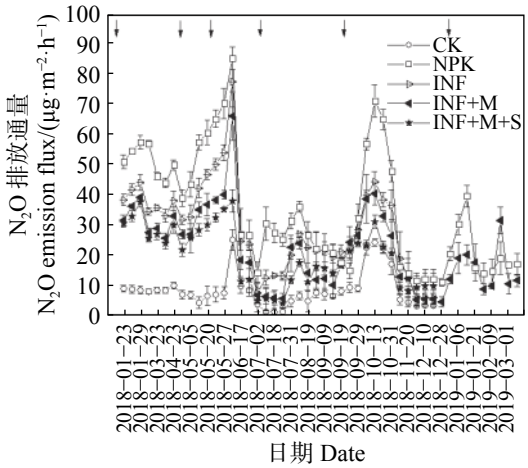

图 5　不同处理土壤 N_2O 排放通量的动态变化

箭头代表施肥时间

Fig. 5　The dynamic change of N_2O emission flux under different treatments

Arrow represents the date of fertilization.

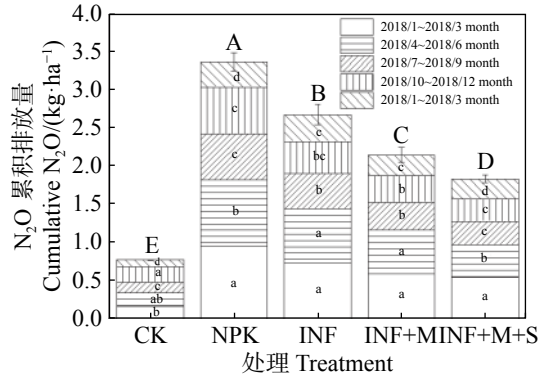

图 6　不同处理土壤 N_2O 累积排放量的动态变化

不同小写字母表示同一处理不同时间段差异显著(P<0.05)；不同大写字母表示各处理间差异显著(P<0.05)。

Fig. 6　The dynamic change of accumulative soil N_2O emissions under different treatments

Different lowercase letters indicate significant difference among different time periods of the same treatment at 0.05 level, and different uppercase letters indicated significant difference between treatments at 0.05 level.

2018 年 9 月>2018 年 10 月至 2018 年 12 月>2019 年 1 年至 2019 年 3 月。NPK 和 INF+M+S 处理 N_2O 累积排放量在不同月份段间具有一致的变化规律，其中，NPK 和 INF+M+S 处理在 2018 年 1 月至 2018 年 3 月时间段的 N_2O 累积排放量显著高于其他时间段，而 NPK 和 INF+M+S 处理在 2018 年 7 至 2018 年 9 月、2018 年 10 月至 2018 年 12 月时间段的 N_2O 累积排放量无显著差异，但 NPK 和 INF+M+S 处理在 2018 年 7 月至 2018 年 9 月和 2018 年 10 月至 2018 年 12 月时间段的 N_2O 累积排放量均显著高于 2019 年 1 月至 2019 年 3 月时间段的 N_2O 累积排放量。

2.5　不同施肥处理对菠萝产量及 N_2O 平均排放通量的影响　从菠萝产量看(表 2)，INF+M+S、INF+M 和 INF 较 NPK 分别增产 16.77%，6.66% 和 6.53%，且 INF+M+S 处理与 NPK 间达到显著水平。在整个菠萝生育期间，各处理的 N_2O 平均通量大小依次为 NPK>INF>INF+M>INF+M+S>CK，且差异显著；其中，INF+M+S、INF+M 和 INF 处理 N_2O 平均通量与 NPK 相比分别显著减少了 46.06%，37.15% 和

表 2 不同处理作物产量、N_2O 排放强度和排放系数

Tab. 2 Nitrous oxide emission factor and emission intensity and pineapple yield under different treatments

处理 Treatment	产量/(t·hm^{-2}) Yield	增产/% Increase rate	平均通量/(μg·m^{-2}·h^{-1}) Mean annual flux	排放强度/(t·kg^{-1}) Emission intensity	排放系数/% Emission factor
CK	42.12±6.60c	-	7.76±0.18e	0.02±0d	-
NPK	77.16±6.36b	83.19	34.13±1.30a	0.04±0a	0.32b
INF	82.20±8.29ab	95.16	26.97±1.25b	0.03±0b	0.40a
INF+M	82.30±4.90ab	95.39	21.45±0.72c	0.03±0c	0.29b
INF+M+S	90.10±3.10a	113.91	18.41±0.51d	0.02±0cd	0.22c

注: 同列不同小写字母表示不同施肥处理间差异显著(P<0.05)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between fertilization treatments at 0.05 level.

20.98%。同样, INF+M+S 排放强度最小, 显著小于 NPK 和 INF 处理, 与 INF+M 和 CK 处理相比没有显著差异。IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006)把同时期内由于施用氮肥, 引起的 N_2O−N 排放量占总施氮量的百分比定义为 N_2O 排放系数, 并建议 N_2O−N 排放系数为 1%。排放系数是评价不同管理措施减排效果的参考指标。由表 3 可知, 菠萝整个生育期内 N_2O 排放系数次序为 INF>NPK>INF+M>INF+M+S, 且 INF+M+S 显著小于其他处理, 这也表明在 INF+M+S 处理下 N_2O 排放量最少, 减排效果最佳。

2.6 土壤理化特性与 N_2O 累积排放量的相关性分析 由表 3 可知, NPK、INF、INF+M 和 INF+M+S 处理土壤 N_2O 通量与土壤铵态氮和硝态氮均呈显著正相关(P<0.05)。仅 INF 处理 N_2O 通量与 3 cm 和 7 cm 土壤温度均呈显著正相关(P<0.05)。各处理 N_2O 通量与土壤含水量没有显著性差异。可见土壤铵态氮和硝态氮含量是影响菠萝田 N_2O 排放的主要因素。

众多环境因素影响农田 N_2O 的排放, 为了消除各影响因子间的相互作用, 在不考虑施肥处理影响的前提下, 对菠萝田土壤 N_2O 通量与 3, 7 cm 土壤温度、土壤含水量、铵态氮含量、硝态氮含量进行偏相关性分析。如表 4 所示, 将 3 cm 土壤温度设为控制变量后, N_2O 通量与 7 cm 土壤温度呈显著正相关(R=0.293), 而将 7 cm 土壤温度设为控制变量后, N_2O 通量与 3 cm 土壤温度无显著性差异。将土壤含水量设为控制变量后 N_2O 通量与 3 cm 土壤温度和 7 cm 土壤温度均呈显著正相关, 而将铵态氮和硝态氮分别设为控制变量后 N_2O 通量与 3 cm 土壤温度 7 cm 土壤温度均无显著性差异。当 3 cm 土壤温度、7 cm 土壤温度、铵态氮含量、硝态氮含量分别设为控制变量后, N_2O 通量与土壤含水量均无显著性差异。当 3 cm 土壤温度 7 cm 土壤温度和土壤含水量分别设为控制变量后, N_2O 通量与铵态氮含量和硝态氮含量均呈极显著正相关。偏相关分析结果显示, 3, 7 cm 土壤温度也是影响土壤 N_2O 排放的环境因素, 而土壤含水量对其影响不大。排除土壤温度和土壤含水量的影响后, N_2O 排放通量与土壤铵态氮和硝态氮含量均呈极显著正相关, 可见硝态氮和铵态氮作为 N_2O 底物来源是影响 N_2O 排放的主要因素。

表 3 N_2O 通量与各影响因子的 Pearson 相关系数

Tab. 3 Pearson correlation coefficients between N_2O flux and the impact factors

处理 Treatment	3 cm土温/℃ 3 cm soil temperature	7 cm土温/℃ 7 cm soil temperature	土壤含水量/% Soil water content	铵态氮/ Ammonium N	硝态氮/(mg·kg^{-1}) Nitrate N
CK	0.323^{ns}	0.322^{ns}	0.315^{ns}	0.376^{ns}	0.288^{ns}
NPK	0.462^{ns}	0.582*	0.416^{ns}	0.794**	0.806**
INF	0.532*	0.565*	0.237^{ns}	0.775**	0.701**
INF+M	0.399^{ns}	0.450^{ns}	0.323^{ns}	0.630**	0.591**
INF+M+S	0.425^{ns}	0.445^{ns}	0.137^{ns}	0.780**	0.501*

注: ^{ns} 表示P>0.05, * 表示P <0.05, **表示 P <0.01, 下同。

Note: ^{ns}: P >0.05; *: P <0.05; **: P <0.01. Similarly hereinafter.

表 4　N_2O 通量与各影响因子的偏相关分析

Tab. 4　Partial correlation analysis between N_2O flux and the impact factors

控制变量 Control variable	变量 Variable	3 cm土温/℃ 3 cm soil temperature	7 cm土温/℃ 7 cm soil temperature	土壤含水量/% Soil water content	铵态氮/(mg·kg^{-1}) Ammonium N	硝态氮/(mg·kg^{-1}) Nitrate N
3 cm土温	N_2O通量		0.293^{**}	0.124^{ns}	0.707^{**}	0.640^{**}
	7 cm土温			0.402^{**}	0.226^{*}	0.399^{**}
	土壤含水量				0.016^{ns}	0.202^{ns}
	铵态氮					0.635^{**}
7 cm土温	N_2O通量	-0.217^{ns}		0.091^{ns}	0.690^{**}	0.620^{**}
	3 cm土温			-0.391^{*}	-0.098^{ns}	-0.288^{**}
	土壤含水量				-0.039^{ns}	0.156^{ns}
	铵态氮					0.609^{**}
土壤含水量	N_2O通量	0.343^{**}	0.384^{**}		0.748^{**}	0.686^{**}
	3 cm土温		0.982^{**}		0.523^{**}	0.494^{**}
	7 cm土温				0.552^{ns}	0.543^{**}
	铵态氮					0.736^{**}
铵态氮	N_2O通量	-0.083^{ns}	-0.034^{ns}	0.159^{ns}		0.327^{**}
	3 cm土温		0.971^{**}	0.013^{ns}		0.186^{ns}
	7 cm土温			0.110^{ns}		0.260^{*}
	土壤含水量					0.246^{*}
硝态氮	N_2O通量	0.007^{ns}	0.019^{ns}	-0.007^{ns}	0.488^{**}	
	3 cm土温		0.974^{**}	-0.078^{ns}	0.279^{**}	
	7 cm土温			0.004^{ns}	0.264^{*}	
	土壤含水量				-0.164^{ns}	

3　讨　论

3.1　不同施肥处理对 N_2O 排放的影响　在农田生态系统中 N_2O 的产生和排放过程极其复杂。本研究发现，与常规施肥相比，减少氮肥施用显著降低菠萝地 N_2O 排放。DONG 等[15] 的研究也表明，氮肥减量施用不仅能提高氮肥利用效率，而且可以减少 N_2O 的排放，且 BORDOLOI 等[16] 也有相似的结果，这主要是因为少施氮肥就减少了土壤中硝化与反硝化作用的反应底物浓度，进而减少 N_2O 的产生与排放[17]。不同类型肥料配施也可以影响农田 N_2O 的排放。本研究结果表明，无机肥+有机肥(羊粪)配施(INF+M)处理与常规施肥处理相比显著降低 N_2O 累积排放量和 N_2O 排放强度，这与郝耀旭等[18] 和杨丹等[19] 的研究结果相同，他们也发现有机氮替代部分无机氮后，可以减少土壤 N_2O 排放。这可能一方面因为无机氮肥减少使土壤中 N 素缺乏导致作物和土壤微生物对 N 素的竞争，进而 N 素利用比较充分，抑制了 N_2O 排放[20]，另一方面由于有机质分解过程中消耗土壤中的氧气，抑制了土壤 N_2O 的产生[21]。而李平等[22] 和王聪等[23] 的研究发现，氮肥配施有机肥能提高土壤 N_2O 的排放，主要是因为碳氮比“升高”，碳源“过剩”，N 素的含量超过作物和土壤微生物的需求，多余的 N 可能通过硝化和反硝化形成 N_2O 排放出去[20]。这也表明无机肥与有机肥配施对土壤 N_2O 排放的影响需要进一步研究。

缓释肥因其肥效长，能降低农田肥料的损失而被逐渐应用于农田生产[24]。本研究中发现，无机肥+有机肥+缓控肥配施(INF+M+S)处理与其他施肥处理相比显著降低 N_2O 累积排放量和 N_2O 排放强度，且相

比无机肥+有机肥处理 N_2O 排放降低了 16.67%，这与田伟等[8]、ZHANG 等[11] 和方畅宇等[21] 的研究结果一致，这主要由于缓控释肥通过减缓氮素释放，有利于植物长效吸收，减少氮素损失，进而减少农田土壤 N_2O 的排放[25]。这也表明缓控释肥在改善农田环境方面有重要的意义。

3.2 不同施肥处理下土壤环境因子对土壤 N_2O 排放的影响 施肥通过改变土壤理化性质（土壤温度、土壤含水量、硝态氮和铵态氮含量）和生物因子[26]，影响土壤微生物的活性，从而对硝化、反硝化作用以及 N_2O 排放产生影响[27]。土壤温度影响微生物代谢活动强度，并通过影响硝化和反硝化作用的反应速率来影响 N_2O 的排放，一般情况下，土壤 N_2O 的产生随土壤温度升高而增加[28]。本研究中，只有 INF 处理与土壤温度呈显著正相关，其他处理土壤温度与 N_2O 排放无显著相关性，这与徐文彬等[29] 的研究结果一致。在本研究偏相关分析中，在控制土壤含水量的前提下 N_2O 通量与 3，7 cm 土壤温度均呈显著正相关，这与前人的研究结果一致[30]。可能是由于土壤中存在的其他强烈影响 N_2O 产生的因子（气候、降雨和施肥等）时，温度的影响则会被掩盖。土壤含水量通过影响土壤的通气状况，进一步影响土壤中氧气含量使得土壤硝化和反硝化过程发生变化，影响 N_2O 的产生与排放。有研究发现，N_2O 的排放与土壤含水量呈正相关关系，但并不总是显著；在最大持水量以下，N_2O 产生以硝化作用为主[31]；LIN 等[26] 研究也发现，在施肥量较多的稻田和果园中土壤含水量与 N_2O 排放没有显著的相关关系。本研究也有相似的结果，土壤含水量较低，N_2O 的排放与土壤含水量也呈现出正相关关系，但并不显著，这可能是由于菠萝农田土壤为燥红土，保水能力较差，使得土壤含水量一直维持在相对较低的水平。土壤中铵态氮、硝态氮作为硝化和反硝化作用最直接的底物，是限制 N_2O 产生的根本原因。本研究结果表明，N_2O 排放通量与硝态氮以及铵态氮含量呈显著正相关，这与陈哲等[32] 研究结果一致。此外，偏相关分析中，在分别控制 3 cm 土壤温度、7 cm 土壤温度和土壤含水量的前提下，N_2O 排放通量与硝态氮和铵态氮含量仍呈显著正相关。这可能由于铵态氮和硝态氮含量越高，N 素被转化为 N_2O 的量增加，进而造成土壤 N_2O 排放量越多[33]。本研究中，INF、INF+M 和 INF+M+S 处理的硝态氮与铵态氮含量较 NPK 处理显著降低，进而减少了 N_2O 生成与排放。

3.3 不同施肥处理对菠萝产量的影响 有机无机配施处理不仅提高作物产量，还能获得较高的生态环境效益[34]。在等氮施用条件下，有机肥替代部分化肥能够提高作物产量[35]，张婧等[36] 研究结果表明，缓控释肥施用也能提高作物产量；田伟等[8] 发现，优化施肥配合羊粪有机肥和缓控释肥施用替代化肥能提高水稻产量。本研究也得到相似的结果，且无机肥+有机肥+缓控肥配施（INF+M+S）处理与常规施肥（NPK）相比显著提高了菠萝产量，这可能是由于缓控释肥分解较慢，肥效长，且不容易淋失，有利于菠萝根系吸收，可以提高肥料的利用效率[37]，并且有机肥更能够改良土壤，使养分释放较慢。3 种优化配方施肥模式相比，无机肥+有机肥+缓控肥配施（INF+M+S）处理增产减排效果最显著。一方面该处理降低了氮素的投入，且无机肥+有机肥+缓控肥配施（INF+M+S）处理改善了土壤理化性质，减少土壤中无效硝态氮与铵态氮损失，促进菠萝对氮素的吸收，提高了肥料利用效率，进而减少了 N_2O 排放；另一方面，菠萝生长周期长，有机肥和缓控肥分解释放的氮素能够及时补充其后期生长所需，因此，无机肥+有机肥+缓控肥配施增产效果最显著。减量单施化肥（INF）、无机肥+有机肥配施（INF+M）和无机肥+有机肥+缓控肥配施（INF+M+S）处理均可以显著降低 N_2O 排放量和提高菠萝产量。土壤硝态氮和铵态氮是影响 N_2O 排放的重要因素，其与 N_2O 排放通量呈现显著正相关。INF+M+S 处理下菠萝产量最高，N_2O 排放最低，可以作为热带地区增产减排菠萝的施肥模式。

参考文献：

[1] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[2] SYAKILA A, KROEZE C. The global nitrous oxide budget revisited [J]. Greenhouse Gas Measurement and Management, 2011, 1(1): 17 − 26.

[3] 蒋静艳, 黄耀. 农业土壤 N_2O 排放的研究进展[J]. 农业环境保护, 2001, 20(1): 51 − 54.

[4] 张中杰, 朱波, 项红艳. 氮肥施用对西南地区紫色土冬小麦 N_2O 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.
[5] ZHOU J Y, GU B J, SCHLESINGER W H, et al. Significant accumulation of nitrate in Chinese semi-humid croplands [J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 25088.
[6] HU K L, HUANG Y F, LI H, et al. Spatial variability of shallow groundwater level, electrical conductivity and nitrate concentration, and risk assessment of nitrate contamination in North China Plain [J]. Environment International, 2005, 31(6): 896 − 903.
[7] 郭晨, 徐正伟, 王斌, 等. 缓/控释尿素对稻田周年 H_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1489 − 1495.
[8] 田伟, 伍延正, 孟磊, 等. 不同施肥模式对热区晚稻水田 H_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2426 − 2434.
[9] 刘兆辉, 吴小宾, 谭德水, 等. 一次性施肥在我国主要粮食作物中的应用与环境效应[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3827 − 3839.
[10] 张婧, 夏光利, 李虎, 等. 一次性施肥技术对冬小麦/夏玉米轮作系统土壤 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 195 − 204.
[11] ZHANG Z S, CHEN J, LI C F, et al. Effects of nitrogen fertilizer sources and tillage practices on greenhouse gas emissions in paddy fields of central China [J]. Atmospheric Environment, 2016, 144(11): 274 − 281.
[12] 刘海清, 李光辉, 黄媛媛, 等. 2011 年中国菠萝产业发展现状分析[J]. 热带农业科学, 2012, 32(3): 79 − 83.
[13] THAMMASAT U, FAC E, DEPT C E, et al. Evaluation of opportunities to reduce the carbon footprint of fresh and canned pineapple processing in central Thailand [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2017, 26(4): 1725 − 1735.
[14] 郑良永, 郑龙. 我国菠萝水肥管理研究现状、存在问题及研究展望[J]. 南方农业, 2013, 7(3): 35 − 37.
[15] DONG W, GUO J, XU L, et al. Water regime-nitrogen fertilizer incorporation interaction: Field study on methane and nitrous oxide emissions from a rice agroecosystem in Harbin, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, 64(2): 289 − 297.
[16] BORDOLOI N, BARUAH K K, BHATTACHARYYA P, et al. Impact of nitrogen fertilization and tillage practices on nitrous oxide emission from a summer rice ecosystem [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2019, 65(11): 1493 − 1506.
[17] MARASENI T N, QU J S. An international comparison of agricultural nitrous oxide emissions [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 135: 1256 − 1266.
[18] 郝耀旭, 刘继璇, 袁梦轩, 等. 长期定位有机物料还田对关中平原冬小麦−玉米轮作土壤 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(6): 2586 − 2593.
[19] 杨丹, 叶祝弘, 肖珣, 等. 化肥减量配施有机肥对早稻田温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2443 − 2450.
[20] LIN S, IQBAL J, HU R, et al. Nitrous oxide emissions from yellow brown soil as affected by incorporation of crop residues with different carbon-to-nitrogen ratios: A case study in central China [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2013, 65(2): 183 − 192.
[21] 方畅宇, 屠乃美, 张清壮, 等. 不同施肥模式对稻田土壤速效养分含量及水稻产量的影响[J]. 土壤, 2018, 50(3): 462 − 468.
[22] 李平, 郎漫, 李淼, 等. 不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响[J]. 环境科学, 2018, 39(5): 2360 − 2367.
[23] 王聪, 沈健林, 郑亮, 等. 猪粪化肥配施对双季稻田 H_4 和 N_2O 排放及其全球增温潜势的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(8): 3120 − 3127.
[24] BODELIER P L E, ROSLEV P, HENCKEL T, et al. Stimulation by ammonium-based fertilizers of methane oxidation in soil around rice roots [J]. Nature, 2000, 403(6768): 421 − 424.
[25] 黄益宗, 张福珠, 刘淑琴, 等. 化感物质对土壤 N_2O 释放影响的研究[J]. 环境科学学报, 1999, 19(5): 478 − 482.
[26] LIN S, IQBAL J, HU R G, et al. Differences in nitrous oxide fluxes from red soil under different land uses in mid-subtropical China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2012, 146(1): 168 − 178.
[27] LIN S, IQBAL J, HU R G, et al. 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.
[28] ZHENG X H, WANG M X, WANG Y S, et al. Impacts of temperature on N_2O production and emission [J]. Environmental Science, 1997, 18(5): 1 − 5.
[29] 徐文彬, 洪业汤, 陈旭晖, 等. 贵州省旱田土壤 N_2O 释放及其环境影响因素[J]. 环境科学, 2000, 21(1): 7 − 11.
[30] LIU J, JIANG P K, LI Y F, et al. Responses of N_2O flux from forest soils to land use change in subtropical China [J]. Botanical Review, 2011, 77(3): 320 − 325.
[31] MUMMEY D L, SMITH J L, BOLTON H. Nitrous oxide flux from a shrub-steppe ecosystem: sources and regulation [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1994, 26(2): 279 − 286.
[32] 陈哲, 陈媛媛, 高霁, 等. 不同施肥措施对黄河上游灌区油葵田土壤 N_2O 排放的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1):

129 − 139.
[33] GU J, NICOULLAUD B, ROCHETTE P, et al. A regional experiment suggests that soil texture is a major control of N_2O emissions from tile-drained winter wheat fields during the fertilization period [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 60: 134 − 141.
[34] 姜珊珊, 庞炳坤, 张敬沙, 等. 减氮及不同肥料配施对稻田 H_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2017, 37(5): 1741 − 1750.
[35] 刘沙沙, 李兵, 张古彬, 等. 有机肥替代化肥对豫东地区上海青生长及氮磷利用的影响[J]. 农学学报, 2019, 9(8): 14 − 18.
[36] 张婧, 李虎, 朱国梁, 等. 控释肥施用对土壤 N_2O 排放的影响——以华北平原冬小麦/夏玉米轮作系统为例[J]. 生态学报, 2017, 37(22): 7624 − 7635.
[37] 刘宁, 孙振涛, 韩晓日, 等. 缓/控释肥料的研究进展及存在问题[J]. 土壤通报, 2010, 41(4): 1005 − 1009.

Effects of Fertilizer Application on Pineapple Yield and Nitrous Oxide Emission from the Pineapple Field

FU Chunmin[1], YIN Liyan[1], DENG Yan[2], LAN Chaojie[2], HAN Zhongyu[2], JIN Xin[2], LI Changjiang[2], HUANG Jiaquan[2]

(1. School of Life and Pharmaceutical Sciences, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Hainan Key Laboratory for Sustainable Utilization of Tropical Bioresources, College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China)

Abstract: An attempt was made to explore the N_2O emission characteristics of pineapple (*Ananas comosus*) soil under different fertilizer treatments to screen out an optimum fertilizer application approach which reduces N_2O emissions and gives high pineapple yield. A fertilizer application trial was arranged in a pineapple field in the tropical region, and five treatments were arranged in the trial: no fertilizer (CK), conventional fertilizer (NPK), single application of fertilizer at a reduced rate (INF), combined application of inorganic fertilizer + organic fertilizer (INF+M), combined application of inorganic fertilizer + organic fertilizer + slow-control fertilizer (INF+M+S). The soil N_2O emissions were monitored by using static black box-gas chromatography, and the relationship of soil temperature, soil moisture, nitrate nitrogen and ammonium nitrogen with N_2O emissions and pineapple yield was analyzed under different treatments. The results showed that the INF+M+S, INF+M and INF treatments increased pineapple yield by 16.77%, 6.66% and 6.53%, respectively, when compared with the NPK treatment. During the whole pineapple growth stage, the N_2O cumulative emission and average flux detected in the treatments were increased in the order of NPK> INF> INF+M> INF+M+S> CK and were significantly different between the treatments. The emission intensity was increased in the order of NPK>INF>INF+M>INF+M+S>CK and was significantly different between the treatments. The INF+M+S treatment had a significantly lower emission coefficient than all the other treatments. The soil N_2O emission flux was significantly positively correlated with soil ammonium nitrogen content and soil nitrate nitrogen content. The INF+M+S treatment increased pineapple yield significantly and reduced the N_2O emission in the pineapple field at the whole growth stage, and it can hence be used as an optimum approach for fertilizer application to pineapple.

Keywords: *Ananas comosus*(L.) Merr; tropical region; fertilizer regime; N_2O emission; yield

(责任编辑:潘学峰)