

doi: 10.13866/j.azr.2017.06.14

棉花秸秆和氮肥对土壤 CO₂ 和 N₂O 排放及 碳氮排放系数的影响^①

牛百成^{1 2 3}, 赵成义¹, 俞永祥^{1 3}, 谭立海², 安志山²

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所绿洲生态与荒漠环境国家重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011;

2. 中国科学院西北生态环境资源研究院敦煌戈壁生态与环境研究站, 甘肃 兰州 730000;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 以新疆绿洲棉田土壤为研究对象, 通过室内控制试验, 针对棉花秸秆结合氮肥等不同处理进行了为期 63 d 的 CO₂ 和 N₂O 排放观测, 探讨秸秆和氮肥施用对土壤有机碳和全氮含量及碳氮排放系数的影响。结果表明: 秸秆显著增加 CO₂ 和 N₂O 排放量, 而氮肥对 CO₂ 排放量无显著影响, 但却显著增加了 N₂O 排放量。在施加秸秆和氮肥处理下, CO₂ 排放速率在前 16 d 较快, 而 N₂O 排放速率在前 3~5 d 较快。施加秸秆均能增加土壤有机碳和全氮含量; 而施加氮肥降低了土壤有机碳含量, 提高了土壤全氮含量。在不同量秸秆和氮肥的配比下, 计算得出: 秸秆还田产生的有机碳约有 47.67% (均值) 以 CO₂ 形式排出, 其中在全量秸秆和低氮量水平下最高, 约为 48.71% 和 50.72%; 秸秆碳的排放系数平均值为 35.2%, 但不是常数; 秸秆氮的排放系数随施氮量增加而增大, 与秸秆量没有直接关系; 尿素氮的排放系数均随秸秆量和氮量的增加而增大。

关键词: 棉花秸秆; 土壤; CO₂; N₂O; 有机碳; 排放系数

目前, 大气中 CO₂ 和 N₂O 浓度分别到了 0.391 mg·kg⁻¹ 和 0.324 mg·kg⁻¹, 与工业化前相比分别提高了 40% 和 20%, 其浓度达到了 80 万年以来的最高值^[1]。近些年, 有许多研究表明, 农田生态系统对全球气候变暖的影响表现的更加突出^[2-3], 如农田管理措施中的秸秆还田和施肥, 对土壤温室气体排放起着重要的影响^[4]。

棉花是新疆绿洲农业主要种植的农作物之一, 其秸秆资源非常丰富。过去棉花秸秆主要用作牲畜饲料和燃料等, 随着生活水平和机械化程度的提高, 目前棉花秸秆还田率已高达 95%^[5]。秸秆还田是农业生产中常见的耕作方式, 为农作物生长提供了所需的多种元素。有研究表明秸秆还田不仅能增加土壤养分含量, 而且也能改善土壤的理化性质, 提高农作物产量^[6-7], 但秸秆还田也会带来负面效应, 如秸秆还田促进温室气体的排放, 影响全球变化^[8-9]。在现实生产过程中为了提高作物产量, 人们一味的增加氮肥使用量, 来促进农作物生长, 并提高产量,

但氮素的过度施用, 也会出现一些环境问题, 如地下水的污染、富营养化及温室效应等^[10-11]。

秸秆还田能增加 CO₂ 的排放, 而对 N₂O 排放的影响有很大的不确定性^[12]。氮肥对 CO₂ 排放的影响也有很大的不确定性^[13], 但却增加了 N₂O 排放^[14]。与单独施用秸秆相比, 秸秆配施氮肥不仅能增加土壤氮素的累积, 提高土壤肥力, 也能提高秸秆肥料的利用率^[15-16], 秸秆配施化肥会增加土壤中 CO₂ 和 N₂O 排放量^[8, 16]。目前, 对于秸秆还田的研究主要集中于小麦、玉米、水稻及油菜等对 CO₂ 和 N₂O 排放的影响^[8, 17], 对棉花秸秆还田及配施氮肥对 CO₂ 和 N₂O 排放的影响鲜有报道。

本研究通过室内模拟试验, 分析棉花秸秆和氮肥对土壤 CO₂ 和 N₂O 排放及土壤碳氮含量的影响, 并以棉花秸秆和氮肥施加量为依据, 分析棉花秸秆的碳、氮及尿素氮的排放系数, 为干旱区绿洲农田生态系统碳氮循环、合理利用棉花秸秆和施用氮肥及减少环境污染等提供科学依据。

① 收稿日期: 2017-01-16; 修订日期: 2017-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671030, U1403281) 资助

作者简介: 牛百成(1987-) 男, 硕士, 主要从事农田土壤碳循环研究。E-mail: niubch@foxmail.com

通讯作者: 赵成义。E-mail: zcy@ms.xjbi.ac.cn

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于塔里木盆地北缘的中国科学院绿洲农田生态系统国家野外科学观测研究站(80°45'E, 40°37'N) 站区海拔1 028 m。阿克苏站所在的绿洲代表了暖温带干旱绿洲农田生态系统类型,是世界上极端干旱区的代表区域。该地区年平均气温11.2℃,年降雨量45.7 mm,无霜期207 d,全年日照时数约2 940 h,年太阳辐射总量约6 000 MJ·m⁻²。试验地土壤类型为盐化潮土,土壤质地为粉砂土壤(44%沙粒、50%粉粒和6%黏粒),土壤pH为7.16;有机质为6.96 g·kg⁻¹;全氮为0.48 g·kg⁻¹;有效氮为27.12 mg·kg⁻¹;供试棉花秸秆的全碳445 g·kg⁻¹,全氮为13.03 g·kg⁻¹。

1.2 试验设计

供试土壤采自阿克苏站棉田表层土壤(0~20 cm)。土壤在阴凉处自然风干后除去杂物,并过2 mm筛子。试验设计了2个因素,根据阿克苏地区施肥情况,棉花秸秆处理设4个水平:对照(不施加秸秆 NS)、施加秸秆0.45 g(HS)、施加秸秆0.9 g(TS)和施加秸秆1.8 g(DS)。氮肥处理设3个水平:对照(0 kg N·hm⁻² NN)、低氮(200 kg N·hm⁻² LN)和高氮(400 kg N·hm⁻² HN),试验所用的氮肥为尿素,含氮量为46.6%。外加3个空培养瓶用于测定空气中各种气体的本底浓度值,每个处理重复3次,总共39个培养瓶,培养瓶的容积为730 mL,最上面有个三通阀,供抽取气体使用,瓶盖中心有个橡胶塞起封闭作用,装置见图1。

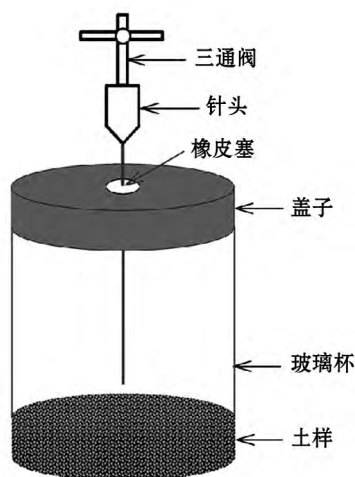


图1 模拟培养装置

Fig. 1 Analog device of the incubation experiment

1.3 试验培养

分别称取相当于风干土100 g的土壤,按照试验设计均匀混合定量的粉状棉花秸秆加入培养瓶中,同时将尿素以1.345 g·L⁻¹的溶液形式加入培养瓶中,然后用蒸馏水调节至田间最大持水量的60%。操作完成后,拧紧瓶盖置于(25±0.5)℃黑暗培养63 d。气体采集时间为:1、3、5、9、13、17、21、25、29、33、39、45、51、57 d和63 d,在规定的时间内用注射器通过三通阀抽取30 mL样气,每次抽气后拧开瓶盖(3个空气瓶均匀置于处理瓶中间,便于更加精确测定培养瓶中气体的本底浓度值)并轻轻煽动培养瓶上方空气,使其加速流动,静置5 min后,用注射器进行水分补充,拧紧瓶盖继续置于培养箱中培养,为下次抽气做准备。

1.4 CO₂和N₂O浓度测定

CO₂和N₂O浓度用气相色谱仪(Agilent7890A, Agilent, Palo Alto, USA)进行测定。

1.5 数据处理

(1) 秸秆和氮肥对土壤有机碳(SOC)和以CO₂形式排放的碳(CO₂-C)所占秸秆腐解释放总碳量的比例计算过程如下:

$$\text{SOC和CO}_2\text{-C所占秸秆腐解释放碳量比例} = \text{SOC}/(\text{CO}_2\text{-C})$$

$$\text{SOC} = \text{SOC}_S - \text{SOC}_{NS} \quad (1)$$

$$\text{CO}_2\text{-C} = \text{CO}_2\text{-C}_S - \text{CO}_2\text{-C}_{NS} \quad (2)$$

式中: SOC_S为有秸秆处理下SOC含量, SOC_{NS}为无秸秆处理下SOC含量; CO₂-C_S为有秸秆处理下CO₂-C累积排放量, CO₂-C_{NS}为无秸秆处理下CO₂-C累积排放量(SOC和CO₂-C均包括3个氮肥水平)。

(2) 碳和氮的排放系数是指每克碳或氮中,以CO₂-C或N₂O-N排放出的碳、氮分别占秸秆碳、氮以及尿素氮的比例^[8]。计算如下:

$$\text{EF}_{SC} = \left[\left(\sum \text{CO}_2\text{-C}_{SC} - \sum \text{CO}_2\text{-C}_{NS} \right) / C_S \right] \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{EF}_{SN} = \left[\left(\sum \text{N}_2\text{O-N}_{SU} - \sum \text{N}_2\text{O-N}_{NS} \right) / N_S \right] \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{EF}_{UN} = \left[\left(\sum \text{N}_2\text{O-N}_{UN} - \sum \text{N}_2\text{O-N}_{NN} \right) / N_U \right] \times 100\% \quad (5)$$

式中: EF_{SC}为秸秆中碳的排放系数; EF_{SN}为秸秆中氮的排放系数; EF_{UN}为尿素中氮的排放系数; CO₂-C_{SC}

为有秸秆处理下 $\text{CO}_2\text{-C}$ 累积排放量; $\text{CO}_2\text{-C}_{\text{NS}}$ 为无秸秆处理下 $\text{CO}_2\text{-C}$ 累积排放量(包括 3 个氮肥水平); $\text{N}_2\text{O-N}_{\text{SU}}$ 为有秸秆处理下 $\text{N}_2\text{O-N}$ 累积排放量; $\text{N}_2\text{O-N}_{\text{NS}}$ 为无秸秆处理下 $\text{N}_2\text{O-N}$ 累积排放量(包括 3 个氮肥处理); $\text{N}_2\text{O-N}_{\text{UN}}$ 为施氮肥处理下 $\text{N}_2\text{O-N}$ 累积排放量; $\text{N}_2\text{O-N}_{\text{NN}}$ 为无施氮肥处理下 $\text{N}_2\text{O-N}$ 累积排放量(包括 4 个不同量秸秆处理); C_S 为秸秆含碳量; N_S 为秸秆含氮量; N_U 为尿素的含氮量。

(3) 采用 SPSS 16.0 软件进行方差分析(ANOVA), 差异显著性水平($P < 0.05$) 通过最小显著差数法(LSD) 进行检验, 并采用 Origin 9.0 软件绘图。土壤 CO_2 和 N_2O 累积排放量和土壤有机碳氮含量以平均值加减标准差($\text{mean} \pm \text{SD}$) 表示。

2 结果与分析

2.1 棉花秸秆和氮肥对 CO_2 和 N_2O 排放的影响

秸秆对土壤 CO_2 累积排放量的影响大于氮肥(图 2a 和图 2b)。在施加秸秆的处理中(图 2a), 前 16 d 的土壤 CO_2 排放速率较快, 此后趋于缓慢, 而在未施加秸秆处理中, 土壤 CO_2 排放速率始终较缓慢。在施加不同量氮肥的处理中(图 2b), 也表现为前 16 d 的土壤 CO_2 排放速率较快, 此后趋于缓慢。

所有的处理中, DS + HN 处理的土壤 CO_2 累积排放量最大, 约 $3\ 101.35\ \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, NS + NN 处理的土壤 CO_2 累积排放量最低, 约 $124.86\ \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ (表 1)。经过 63 d 的培养, 在同一施氮量下, 随着秸秆施加量的增加, 土壤 CO_2 累积排放量也显著增加(表 1, $P < 0.05$); 在同一施加秸秆量下, 除了 NS 水平外, 其余 3 个施加秸秆量下施氮量对土壤 CO_2 累积排放量无显著性差异(除 DS + LN 和 DS + HN 外)(表 1, $P > 0.05$)。

从图 2c 和图 2d 中可以看出, 土壤 N_2O 最大排放速率均出现在培养的第 3~5 d(除 NN 处理外), 在培养的第 5 d 以后, 虽然各处理的土壤 N_2O 仍然继续排放, 但其排放量远小于前 5 d N_2O 的排放量, 所以土壤 N_2O 累积排放量增长速率出现平缓的趋势。从秸秆施加量对土壤 N_2O 排放的影响来看, 在 3 个施氮量水平下, N_2O 累积排放量均随秸秆施加量的增加而显著增加(除 HS + NN 与 TS + NN 和 HS + LN 与 TS + LN 处理外), 可以看出秸秆对土壤 N_2O 排放具有一定的促进作用(表 1, $P < 0.05$)。从氮肥施加量对土壤 N_2O 排放量的影响来看, 均表现出土壤 N_2O 排放量随着施氮量的增加而显著增加, 施氮显著促进土壤 N_2O 排放(表 1, $P < 0.05$)。所

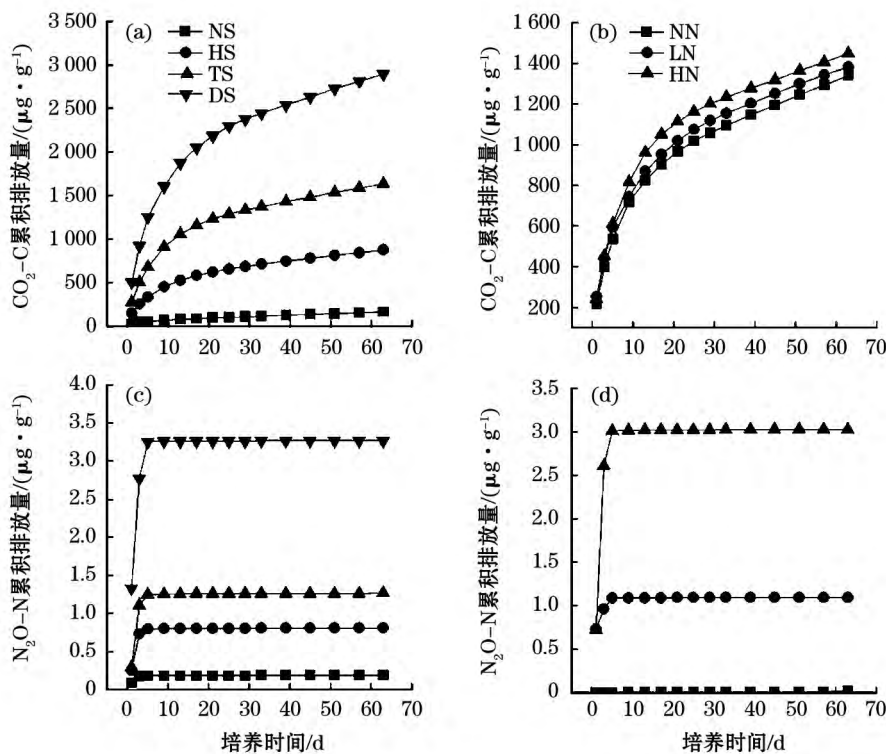


图 2 不同条件下土壤 $\text{CO}_2\text{-C}$ 和 $\text{N}_2\text{O-N}$ 释放规律

Fig. 2 Soil $\text{CO}_2\text{-C}$ and $\text{N}_2\text{O-N}$ emission under different conditions

表 1 秸秆和氮肥对土壤 CO₂-C 和 N₂O-N 累积排放量的影响Tab.1 Effects of straw and nitrogen fertilizer on accumulative emissions of soil CO₂-C and N₂O-N

施氮量		施加秸秆量			
		NS	HS	TS	DS
CO ₂ -C 累积排放量/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	NN	124.86 ± 7.38Aa	867.11 ± 37.02Ab	1 605.75 ± 28.81Ac	2 763.35 ± 84.19ABd
N ₂ O-N 累积排放量/($\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$)		3.16 ± 0.29Aa	9.35 ± 0.2Ab	10.9 ± 1.4Ab	32.9 ± 4.475Ac
CO ₂ -C 累积排放量/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	LN	164.58 ± 9.47Ba	899.97 ± 5.68Ab	1 645.06 ± 33.89Ac	2 676.38 ± 340.6Ad
N ₂ O-N 累积排放量/($\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$)		150.8 ± 16.2Ba	707 ± 95.2Bb	801.7 ± 185.5Bb	1 976.9 ± 515Bc
CO ₂ -C 累积排放量/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	HN	203.96 ± 19.6Ca	850.68 ± 67.5Ab	1 644.59 ± 24.9Ac	3 101.35 ± 71.8Bd
N ₂ O-N 累积排放量/($\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$)		394.5 ± 52.8Ca	1 715.7 ± 319Cb	2 972.4 ± 712Cc	6 341.3 ± 964Cd

注: 在同量秸秆下,不同氮量多重比较在 5% 水平下进行(大写字母),下同;在相同氮量下,不同秸秆量多重比较在 5% 水平下进行(小写字母),下同。

表 2 秸秆和氮肥对土壤有机碳和全氮含量的影响

Tab.2 Effects of straw and nitrogen fertilizer on SOC and Total N content

施氮量		施加秸秆量			
		NS	HS	TS	DS
土壤有机碳 SOC/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	NN	4.10 ± 0.05Aa	5.00 ± 0.20Ab	5.66 ± 0.21Ac	7.47 ± 0.20Ad
土壤全氮 N/($\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$)		0.54 ± 0.03Aa	0.55 ± 0.01Ab	0.64 ± 0.02Aabc	0.71 ± 0.09Ac
土壤有机碳 SOC/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	LN	4.27 ± 0.15Aa	4.85 ± 0.15Ab	5.73 ± 0.09Ac	7.23 ± 0.18ABd
土壤全氮 N/($\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$)		0.56 ± 0.03Aa	0.64 ± 0.01Bab	0.74 ± 0.07Bc	0.80 ± 0.04Ad
土壤有机碳 SOC/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	HN	4.15 ± 0.09Aa	5.05 ± 0.24Ab	5.77 ± 0.43Ac	7.02 ± 0.24Bd
土壤全氮 N/($\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$)		0.58 ± 0.02Aa	0.68 ± 0.03Cb	0.75 ± 0.01ABc	0.82 ± 0.06Ad

有的处理中,土壤 N₂O 累积排放量在 DS + HN 处理中最大,约 6 341.3 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$,在 NS + NN 处理中最小,约 3.16 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (表 1)。

2.2 秸秆和氮肥对土壤有机碳和全氮含量的影响

经过 63 d 的培养,土壤有机碳含量出现明显变化(表 2)。从秸秆对土壤有机碳含量的影响来看,在同一氮量下,土壤有机碳含量随着秸秆施加量的增加而显著增加(表 2, $P < 0.05$)。用施加棉花秸秆和未施加棉花秸秆的土壤有机碳之差来表示棉花秸秆还田对土壤有机碳含量的影响。HS、TS 和 DS 水平下的土壤有机碳含量与 NS 相比,平均提高了 0.8、1.55 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 3.07 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。从氮肥对土壤有机碳含量的影响来看,在同一秸秆量下,除 DS + NN 和 DS + HN 处理外,其余各处理之间均无显著性差异(表 2, $P > 0.05$)。用施氮肥和未施氮肥的土壤有机碳之差来表示氮肥对土壤有机碳含量的影响。LN 和 HN 水平下的土壤有机碳含量与 NN 相比,平均降低了 0.038 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 0.06 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,可以看出施氮肥能降低土壤有机碳的含量。

与秸秆对土壤有机碳含量的影响相比,秸秆对土壤全氮含量的影响较小(表 2)。从秸秆对土壤全

氮含量的影响来看,在相同氮含量下,均随着秸秆施加量的增加而增加。DS、TS 和 HS 水平下的土壤全氮含量与 NS 相比,平均提高 0.217、0.15 和 0.063 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,表明施加棉花秸秆增加了土壤全氮含量。从氮肥对土壤全氮含量的影响来看,在同一秸秆量下,均呈现出随着施氮量的增加而增加。在 LN 和 HN 水平下的土壤全氮含量与 NN 相比,平均提高 0.075 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 0.098 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,可以看出施氮也能增加土壤全氮含量。

秸秆腐解产生的土壤有机碳,有部分会被土壤截留,也有部分以 CO₂ 形式排放出去。在大多数处理中,棉花秸秆腐解产生的碳以 CO₂ 形式排放出去的占少部分(所有处理下的平均值为 47.67%),除 HS + LN、TS + LN 和 HS + HN 处理外(55.91%、50.35% 和 50.24%),总体看棉花秸秆还田利大于弊(图 3)。从秸秆对以 CO₂ 形式排放出去的碳占秸秆腐解产生总碳量的影响来看,在 DS、TS 和 HS 水平下分别占了 46.68%、48.71% 和 47.64%。从氮肥对以 CO₂ 形式排放出去的碳占棉花秸秆腐解产生总碳量的影响来看,在 HN、LN 及 NN 水平下分别占了 46.37%、50.72% 和 45.94%。

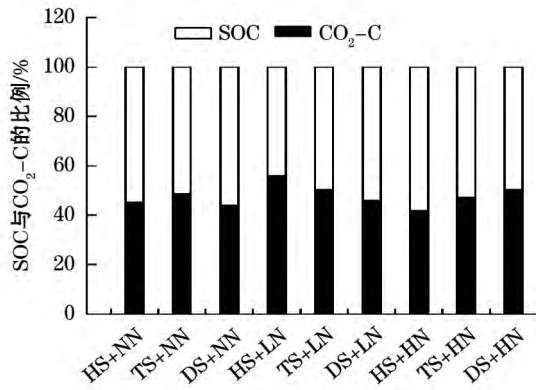


图3 秸秆和氮肥对 SOC 和 CO₂-C 所占秸秆腐解释放碳量比例的影响

Fig. 3 Effects of straw and nitrogen fertilizer on proportions of SOC and CO₂-C in straw-derived C

2.3 秸秆和氮肥对秸秆碳、氮和尿素氮排放系数的影响

碳和氮的排放系数是指每克碳或氮中,以 CO₂ 和 N₂O 排放出的碳、氮分别占秸秆碳、氮以及尿素氮的比例⁽⁸⁾。计算如下:

$$EF_{SC} = \left[\left(\sum CO_2-C_{SC} - \sum CO_2-C_{NS} \right) / C_s \right] \times 100\% \quad (1)$$

$$EF_{SN} = \left[\left(\sum N_2O-N_{SU} - \sum N_2O-N_{NS} \right) / N_s \right] \times 100\% \quad (2)$$

$$EF_{UN} = \left[\left(\sum N_2O-N_{UN} - \sum N_2O-N_{NN} \right) / N_u \right] \times 100\% \quad (3)$$

表3 秸秆和氮肥对秸秆碳氮和尿素氮排放系数的影响

Tab. 3 Effects of straw and nitrogen fertilizer on emission efficiencies of C and N of straw and N of urea

施秸秆量	施氮量								
	NN	LN	HN	NN	LN	HN	NN	LN	HN
	EF _{SC} / %			EF _{SN} / %			EF _{UN} / %		
NS	-	-	-	-	-	-	-	0.20 ± 0.02	0.27 ± 0.04
HS	37.1 ± 1.9	36.8 ± 0.5	32.3 ± 4.3	0.012 ± 0.007	0.951 ± 0.139	2.261 ± 0.486	-	0.94 ± 0.13	1.16 ± 0.00
TS	37.0 ± 0.8	37.0 ± 0.6	36.0 ± 1.1	0.007 ± 0.000	0.556 ± 0.162	2.203 ± 0.647	-	1.07 ± 0.25	2.00 ± 0.48
DS	33.0 ± 1.1	31.4 ± 4.3	36.2 ± 1.0	0.013 ± 0.001	0.780 ± 0.213	2.531 ± 0.401	-	2.63 ± 0.70	4.26 ± 0.65

3 讨论

3.1 秸秆和氮肥对土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响

在农业生产过程中,秸秆还田和施肥是非常普遍的农田管理措施。秸秆还田和施肥对土壤碳氮循环起着至关重要的作用⁽¹⁸⁻¹⁹⁾。秸秆还田将直接或者间接地影响土壤理化性质、碳和氮的循环、水溶性

式中: EF_{SC} 为秸秆中碳的排放系数; EF_{SN} 为秸秆中氮的排放系数; EF_{UN} 为尿素中氮的排放系数; CO₂-C_{SC} 为有秸秆处理下 CO₂-C 累积排放量, CO₂-C_{NS} 为无秸秆处理下 CO₂-C 累积排放量(包括 3 个氮肥水平); N₂O-N_{SU} 为有秸秆处理下 N₂O-N 累积排放量, N₂O-N_{NS} 为无秸秆处理下 N₂O-N 累积排放量(包括 3 个氮肥处理); N₂O-N_{UN} 为施氮肥处理下 N₂O-N 累积排放量, N₂O-N_{NN} 为无施氮肥处理下 N₂O-N 累积排放量(包括 4 个不同量秸秆处理); C_s 为秸秆含碳量; N_s 为秸秆含氮量; N_u 为尿素的含氮量。

如表 3 所示, EF_{SC} 变化为 31.4% ~ 37.1%, 其平均值约为 35.2%。从秸秆和氮肥对 EF_{SC} 的影响看, 在 HS、TS、DS 和 NN、LN、HN 水平下的 EF_{SC} 分别为 35.41%、36.68%、33.53% 和 35.71%、35.06%、34.86%, 无明显规律可寻, 但从每个处理看 EF_{SC} 不是一个常数(表 3, EF_{SC})。从秸秆对 EF_{SN} 的影响来看, 在 HN、LN 和 NN 水平下, 秸秆施加量与 EF_{SN} 无明显关系; 从氮肥对 EF_{SN} 的影响来看, 在 DS 水平下, HN 和 LN 分别是 NN 的 205 倍和 85 倍; 在 TS 水平下, HN 和 LN 分别是 NN 的 315 和 78 倍; 在 HS 水平下, HN 和 LN 分别是 NN 的 195 和 60 倍, 表明氮肥对 EF_{SN} 有明显的影响; 从秸秆对 EF_{UN} 的影响来看, 在 LN 和 HN 水平下, EF_{UN} 均随秸秆还田量增加而增大; 从氮肥对 EF_{UN} 的影响来看, 在 DS、TS、HS 和 NS 水平下, EF_{UN} 也随着施氮量的增加而增大, 可以看出在棉花秸秆还田配施氮肥的基础上能促进尿素氮的排放。

有机碳以及微生物数量和活性, 也对酶的活性和数量产生影响, 进而对土壤 CO₂ 和 N₂O 排放产生影响⁽²⁰⁾。

在 NN 水平下, 施氮肥能促进土壤 CO₂ 排放(表 1), 这与 Shao 等⁽¹³⁾ 的研究结果相似, 施氮肥能增加土壤呼吸。在施加秸秆水平下, 施氮肥对于土壤 CO₂ 排放无显著影响, 在 Muhammad 的研究中也得

出了相似的结论^[9]。可能是棉花秸秆本身的性质造成的。有研究发现当秸秆的 C/N 不超过 30 就会造成土壤净氮素矿化,当超过 30 就会引起土壤氮素的固定^[21]; Cayuela 等^[22]也发现棉花秸秆(C/N = 30.5)造成土壤氮素迅速固定,降低了土壤微生物量和活性。在本研究中棉花秸秆的 C/N(约为 34),略高于 Cayuela 等^[22]测得 30.5,可能较快速固定土壤氮素以及降低土壤微生物量和活性。在 Muhammad 等^[9]研究中与其他秸秆相比(试验持续 84 d),发现施加棉花秸秆的土壤 CO₂ 排放量最低^[9]。也有研究发现棉花秸秆含有较多难以快速分解的木质素和纤维,是降低土壤 CO₂ 排放的原因^[8 23]。

本研究发现秸秆配施氮肥相比不施加秸秆和氮肥,在培养前 16 d 能快速增加土壤 CO₂ 排放(图 2a 和图 2b)。在 Wang^[24]和 Muhammad 等^[9]的研究中也得出了相似的结论,发现秸秆和氮肥一起施用,在培养早期(前 10 d)则会加大碳的矿化。可能是在培养前期,由于施氮肥以及棉花秸秆腐解释放出来的 DOC 增加了土壤微生物的数量和活性;后期(16 d 后)由于棉花秸秆 C/N 较高,土壤氮素被固定,土壤微生物对氮素的利用受到限制及秸秆腐解释放的 DOC 减少,降低了土壤微生物的数量和活性。因此,在培养前期(16 d)施加秸秆处理的土壤 CO₂ 排放较快,后期较慢。

土壤 N₂O 的产生机制主要是硝化和反硝化作用^[25]。无机氮是硝化和反硝化细菌的底物^[26]。不仅施氮肥能增加土壤无机氮含量,施加秸秆也能增加无机氮含量^[27]。其次,秸秆还田能增加土壤水溶性有机碳含量^[28],而水溶性有机碳会显著增加土壤反硝化细菌的活性^[26],同时秸秆分解的有机碳增加会促进土壤呼吸和氧气的消耗,增加土壤中厌氧环境,为土壤 N₂O 的产生提供更好的条件^[29],因此,单独施加秸秆和氮肥或者两者一起使用,都促进了土壤 N₂O 的排放。

本研究中,在仅施氮肥和秸秆配施氮肥的处理中,在培养的第 3~5 d 土壤 N₂O 排放较快(图 2),这与 Muhammad 等人在秸秆和氮肥对秸秆分解和 N₂O 排放影响的研究中得到的结论相似,即秸秆配施氮肥处理的土壤 N₂O 最大排放速率出现在培养的第 4~5 d^[9]。可能原因是由于施氮肥和秸秆腐解提供了较多的无机氮,急剧增加了土壤微生物量和活性^[9],以及秸秆腐解提供了水溶性有机碳,进

而在这个时间段急剧增加了土壤 N₂O 排放量。

3.2 秸秆和氮肥对碳氮排放系数的影响

通过分析秸秆和氮肥对秸秆碳、氮和尿素氮排放系数的影响,得出棉花秸秆的 EF_{SC} 变化为 31.40%~37.11%(表 3),EF_{SC} 与棉花秸秆和氮肥施加量之间没有明显的关系,可以看出 EF_{SC} 不是一个常数。蒙世协等在小麦秸秆还田量对晋南地区裸地土壤温室气体排放系数的研究中得出,随着小麦秸秆还田量的增加,秸秆碳的排放系数也增大,并且全量小麦秸秆和半量小麦秸秆还田的 CO₂ 的排放系数高达 73.3% 和 43.3%,明显高于本研究棉花秸秆还田的 EF_{SC}^[30];而 Jacinthe 等在美国俄亥俄州不同小麦秸秆还田量(0.8 t·hm⁻² 和 16 t·hm⁻²)对土壤 CO₂ 排放的试验中,计算由小麦秸秆还田后产生的 CO₂-C 占小麦秸秆还田前全碳的百分比,结果表明 8 t 和 16 t 分别为 60.8% 和 47.7%,8 t 处理的排放系数大于 16 t^[31]。而本研究得出了与 Jacinthe 相似的结论,TS 处理的排放系数最大。上述两位学者研究的结果均大于本研究的结果。可能原因是本研究为室内控制试验,试验期较短以及研究对象为木质素含量较高的棉花秸秆,造成排放系数较低。

本研究发现,EF_{SN} 与秸秆施加量无明显关系,但随施氮量的增加而增加(表 3),可以看出施氮肥对 N₂O 排放影响较大,而 EF_{UN} 均随着秸秆和氮肥施加量的增大而增大。在 Yao 的研究中也表明 EF_{SN} 和 EF_{UN} 虽然不是一个常数,但主要取决于 C:N,随着氮素的增多(也就是 C/N 越小),水溶性有机碳就会增加^[8],从而促进土壤生物活性增加排放。

4 结论

通过室内模拟试验,得出秸秆能显著增加 CO₂ 和 N₂O 排放量,而氮肥对 CO₂ 排放量无显著影响,但却显著增加了 N₂O 排放量。秸秆还田有利于提高土壤有机碳和全氮含量;而氮肥能降低土壤有机碳含量,但提高了土壤全氮含量。在不同量秸秆和氮肥的配比下,通过计算得出秸秆还田利大于弊以及秸秆碳的排放系数不是一个常数;秸秆氮的排放系数随施氮量增加而增大,与秸秆量没有直接关系;尿素氮的排放系数均随秸秆量和氮量的增加而增大。本研究缺点是只进行了室内模拟试验,没有在

大田中进行实际观测,在以后的研究工作中,将结合大田试验,验证该结论,进一步剖析该过程机理,并讨论其尺度特征。

参考文献(References):

- (1) Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate change 2013: The physical science basis. Working group I contribution to the fifth Assessment Report of the IPCC (J). *Computational Geometry* 2014, 18(2): 95–123.
- (2) Beddington J R, Asaduzzaman M, Clark M E, et al. The role for scientists in tackling food insecurity and climate change (J). *Agriculture & Food Security* 2012, 1(1): 1–10.
- (3) Pires M V, da Cunha D A, de Matos Carlos S, et al. Nitrogen-use efficiency, nitrous oxide emissions, and cereal production in Brazil: Current trends and forecasts (J). *PloS One*, 2015, 10(8): e0135234.
- (4) Cayuela M L, Sánchez-Monedero M A, Roig A, et al. Biochar and denitrification in soils: When, how much and why does biochar reduce N₂O emission? (J). *Scientific Reports* 2013, 3(7): 446: 1–732.
- (5) 韩春丽. 新疆棉花长期连作土壤养分时空变化及可持续利用研究(D). 石河子: 石河子大学, 2010. (Han Chunli. Temporal and Spatial Variation of Soil Nutrients of Long-term Monocultural Cotton Field and Soil Sustainable Utilization in Xinjiang (D). Shihezi: Shihezi University 2010.)
- (6) Huang W, Bai Z, Hoefel D, et al. Effects of cotton straw amendment on soil fertility and microbial communities (J). *Frontiers of Environmental Science & Engineering* 2012, 6(3): 336–349.
- (7) Liu C, Lu M, Cui J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: A meta-analysis (J). *Global Change Biology* 2014, 20(5): 1366–1381.
- (8) Huang Y, Zou J, Zheng X, et al. Nitrous oxide emissions as influenced by amendment of plant residues with different C:N ratios (J). *Soil Biology and Biochemistry* 2004, 36(6): 973–981.
- (9) Muhammad W, Vaughan S M, Dalal R C, et al. Crop residues and fertilizer nitrogen influence residue decomposition and nitrous oxide emission from a Vertisol (J). *Biology and Fertility of Soils* 2011, 47(1): 15–23.
- (10) Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, et al. Controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus (J). *Science* 2009, 323(5917): 1014–1015.
- (11) Grassini P, Cassman K G. High-yield maize with large net energy yield and small global warming intensity (J). *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2012, 109(4): 1074–1079.
- (12) 牛百成, 赵成义, 冯广龙, 等. 秸秆还田对绿洲棉田土壤 CO₂ 时空分布的影响 (J). *干旱区研究* 2017, 34(4): 789–797. (Niu Baicheng, Zhao Chengyi, Feng Guanglong, et al. Effects of cotton straw return to field on spatio-temporal distribution of soil CO₂ in Oasis (J). *Arid Zone Research* 2017, 34(4): 789–797.)
- (13) Shao R, Deng L, Yang Q, et al. Nitrogen fertilization increase soil carbon dioxide efflux of winter wheat field: A case study in Northwest China (J). *Soil and Tillage Research* 2014, 143: 164–171.
- (14) 朱小红, 马友华, 杨书运, 等. 施肥对农田温室气体排放的影响研究 (J). *农业环境与发展* 2011, 28(5): 42–46. (Zhu Xiaohong, Ma Youhua, Yang Shuyun, et al. The effects of fertilization on greenhouse gas emissions (J). *Journal of Agricultural Resources and Environment* 2011, 28(5): 42–46.)
- (15) Trinsoutrot I, Recous S, Bentz B, et al. Biochemical quality of crop residues and carbon and nitrogen mineralization kinetics under nonlimiting nitrogen conditions (J). *Soil Science Society of America Journal* 2000, 64(3): 918–926.
- (16) Bhattacharyya P, Roy K S, Neogi S, et al. Effects of rice straw and nitrogen fertilization on greenhouse gas emissions and carbon storage in tropical flooded soil planted with rice (J). *Soil and Tillage Research* 2012, 124: 119–130.
- (17) Toma Y, Hatano R. Effect of crop residue C:N ratio on N₂O emissions from gray lowland soil in Mikasa, Hokkaido, Japan (J). *Soil Science and Plant Nutrition* 2007, 53(2): 198–205.
- (18) Lal R, Negassa W, Lorenz K. Carbon sequestration in soil (J). *Current Opinion in Environmental Sustainability* 2015, 15(5): 423–479.
- (19) Ni K, Ding W, Cai Z, et al. Soil carbon dioxide emission from intensively cultivated black soil in Northeast China: Nitrogen fertilization effect (J). *Journal of Soils and Sediments* 2012, 12(7): 1007–1018.
- (20) 朱鸿杰, 闫晓明, 何成芳, 等. 秸秆还田条件下农田系统碳循环研究进展 (J). *生态环境学报* 2014, 23(2): 344–351. (Zhu Hongjie, Yan Xiaoming, He Chengfang, et al. Effect of returning straw on soil carbon cycle in cropland ecosystem (J). *Ecology and Environmental Sciences* 2014, 23(2): 344–351.)
- (21) Alexander M. Introduction to Soil Microbiology (M). John Wiley & Sons, 1977.
- (22) Cayuela M L, Sinicco T, Mondini C. Mineralization dynamics and biochemical properties during initial decomposition of plant and animal residues in soil (J). *Applied Soil Ecology* 2009, 41(1): 118–127.
- (23) Curtin D, Selles F, Wang H, et al. Carbon dioxide emissions and transformation of soil carbon and nitrogen during wheat straw decomposition (J). *Soil Science Society of America Journal* 1998, 62(4): 1035–1041.
- (24) Wang W J, Baldock J A, Dalal R C, et al. Decomposition dynamics of plant materials in relation to nitrogen availability and biochemistry determined by NMR and wet-chemical analysis (J). *Soil Biology and Biochemistry* 2004, 36(12): 2045–2058.
- (25) Dalal R C, Wang W, Robertson G P, et al. Nitrous oxide emission from Australian agricultural lands and mitigation options: A review (J). *Soil Research* 2003, 41(2): 165–195.
- (26) Beauchamp E G, Trevors J T, Paul J W. Carbon Sources for Bacterial Denitrification (M). Springer New York: *Advances in Soil Science*, 1989: 113–142.
- (27) Liu C, Wang K, Meng S, et al. Effects of irrigation, fertilization and

- crop straw management on nitrous oxide and nitric oxide emissions from a wheat-maize rotation field in northern China (J). *Agriculture ,Ecosystems & Environment* 2011 ,140(1) : 226 – 233.
- (28) Malhi S S ,Lemke R ,Wang Z H ,et al. Tillage ,nitrogen and crop residue effects on crop yield ,nutrient uptake ,soil quality ,and greenhouse gas emissions (J). *Soil and Tillage Research* 2006 ,90 (1) : 171 – 183.
- (29) Miller M N ,Zebarth B J ,Dandie C E ,et al. Crop residue influence on denitrification ,N₂O emissions and denitrifier community abundance in soil (J). *Soil Biology and Biochemistry* 2008 ,40(10) : 2 553 – 2 562.
- (30) 蒙世协 ,刘春岩 ,郑循华 ,等. 小麦秸秆还田量对晋南地区裸地土壤—大气间甲烷、二氧化碳、氧化亚氮和一氧化氮交换的影响 (J). *气候与环境研究* 2012 ,17(4) : 504 – 514. (Meng Shixie ,Liu Chunyan ,Zheng Xunhua ,et al. Effects of the applied amount of wheat straw on methane ,carbon dioxide ,nitrous oxide , and nitric oxide fluxes of a bare soil in South Shanxi (J). *Climatic and Environmental Research* 2012 ,17(4) : 504 – 514.)
- (31) Jacinthe P A ,Lal R ,Kimble J M. Carbon budget and seasonal carbon dioxide emission from a central Ohio Luvisol as influenced by wheat residue amendment (J). *Soil and Tillage Research* 2002 ,67 (2) : 147 – 157.

Effects of Cotton Straw and Nitrogen Fertilizer on Soil CO₂ and N₂O Emissions and Their Coefficients

NIU Bai-cheng^{1 2 3} , ZHAO Cheng-yi¹ , YU Yong-xiang^{1 3} , TAN Li-hai² , AN Zhi-shan²

(1. State Key Laboratory of Oasis Ecology and Desert Environment ,Xinjiang Institute of Ecology and Geography ,Chinese Academy of Sciences ,Urumqi 830011 ,Xinjiang ,China;

2. Dunhuang Station for Gobi Ecological and Environmental Research ,Northwest Institute of Eco-Environment and resources ,Chinese Academy of Sciences ,Lanzhou 730000 ,Gansu ,China;

3. University of Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100049 ,China)

Abstract: In this study ,cotton soil from oasis farmland in Xinjiang was taken as a research object to assess the effects of different amounts of cotton straw and nitrogen fertilizer on soil CO₂ and N₂O emissions ,soil organic carbon content ,total nitrogen content and the coefficients of carbon and nitrogen emissions based on incubation experiment in laboratory. The results showed that the soil CO₂ and N₂O emissions were increased remarkably with adding straw ,while the effect of nitrogen fertilizer on CO₂ emission was not significant ,but the N₂O emission was increased significantly. Under adding straw and nitrogen fertilizer ,the CO₂ emission was fast in the first 16 days ,while the N₂O emission was rapid in the first 3 – 5 days. Soil organic carbon content and total nitrogen content were increased after applying straw. Soil organic carbon content was decreased and the total nitrogen content was increased when nitrogen fertilizer was added. The calculated results are as follows: ① The proportion of soil organic carbon from straw decomposition was 47. 67% , the soil organic carbon released as CO₂ , and the values were the highest (48. 71% and 50. 72%) under the situation of total straw and low nitrogen level; ② The mean emission factor of straw carbon was 35. 2% ,but it was not a constant for different treatments; ③ The emission factor of straw nitrogen was increased with the increase of applying nitrogen amount ,but it was not directly related to straw quantity; ④ The emission factor of urea nitrogen was increased with the increase of applying straw and nitrogen quantities.

Key words: cotton straw; soil; CO₂; N₂O; organic carbon; emission factor