

长期施肥下红壤旱地 CO₂、N₂O 排放特征

黄晶,刘宏斌,王伯仁

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 祁阳农田生态系统国家野外试验站, 北京 100081)

摘要:通过研究长期不同施肥处理对红壤旱地农田土壤温室气体排放的影响, 以为南方红壤旱地农田生态系统土壤碳氮循环机制、环境气体减排和南方红壤旱地农田生态系统 CO₂、N₂O 排放量估算提供科学依据; 基于中国农业科学院红壤实验站长期定位试验, 采用静态箱/气相色谱法, 研究红壤旱地小麦生长季节不同施肥处理(CK、NP、NPK、NPKM、1.5NPKM)下土壤 CO₂、N₂O 排放差异; 结果表明: 在小麦生长季, 不同施肥处理之间土壤呼吸 CO₂、N₂O 排放通量差异显著, 土壤呼吸 CO₂ 年累积排放量在 8284.02~15863.48 kg/hm² 之间, N₂O 年累积排放量在 0.37~2.04 kg/hm² 之间; 各处理土壤呼吸 CO₂ 排放通量的大小变化: 1.5NPKM>NPKM>NPK>CK>NP; 土壤呼吸 N₂O 平均排放通量大小顺序为 1.5NPKM>NPKM>NPK>NP>CK; 土壤呼吸 CO₂ 与 N₂O 排放分别与土壤温度和土壤水分呈现显著相关性($P<0.05$)。所以得出以下结论: 长期不同施肥处理后形成的土壤肥力以及作物生长的差异是影响土壤呼吸 CO₂、N₂O 排放的重要因素; 红壤旱地小麦季土壤呼吸 CO₂、N₂O 排放具有明显的季节变化特征; 土壤 CO₂ 排放主要集中在作物的拔节期和休闲期, 有机肥的配合施用提升红壤旱地肥力、维持红壤旱地可持续发展的同时, 也显著增加了土壤呼吸 CO₂ 和 N₂O 的排放。

关键词:长期施肥; 红壤旱地; CO₂; N₂O

中图分类号: S19

文献标识码: A

论文编号: 2009-1794

CO₂、N₂O Emission from Red Soil Dry-land under Long-term Fertilization

Huang Jing, Liu Hongbin, Wang Boren

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences,
National Observation and Research Station of Farmland Ecosystem in Qiyang, Beijing 100081)

Abstract: By studying the effect of different patterns of long-term fertilization on greenhouse gas emissions of red soil in dryland agricultural soils, in order to provide a scientific basis for soil carbon and nitrogen cycle mechanism of dry-land ecosystem of red soil in south China, the reduction of greenhouse gases emission, and estimation of CO₂, N₂O emission of dry-land ecosystem of red soil in south China. Diurnal variation of soil respiration affected by long-term different fertilization at various growth stages of wheat in red soil dry-land was investigated with the static dark chamber method and gas chromatograph technique in the Experimental station of red soil CAAS; Results show that CO₂, N₂O emission fluxes in different experimental treatments had significant differences Cumulative emissions of CO₂ and N₂O in the year varying in the range of 8284.02 -15863.48 kg/hm² and 0.37-2.04 kg/hm². In terms of the effect of fertilization, the CO₂ emissions followed an order of 1.5NPKM>NPKM>NPK>CK>NP, and N₂O emissions followed an order of 1.5NPKM>NPKM>NPK>NP>CK, The treatment with organic manure increase in CO₂ and N₂O emissions significantly ($P<0.05$) than the others.

基金项目: 973 项目(2005CB121101); “十一五”国家科技支撑计划(2006BAD05B09)。

第一作者简介: 黄晶, 男, 1983 年出生, 湖南汨罗人, 硕士, 助理研究员, 从事红壤旱地肥力与肥料效益研究。通信地址: 426182 湖南省祁阳县文富市镇。Tel: 0746-3841027, E-mail: huangjing1718@yahoo.com.cn。

通讯作者: 刘宏斌, 男, 1970 年出生, 河北秦皇岛人, 博士, 研究员, 从事施肥与环境研究。通信地址: 100081 北京市海淀区中关村南大街 12 号中国农业科学院农业资源与农业区划研究所。Tel: 010-82108763, E-mail: hbliu@caas.ac.cn。

收稿日期: 2009-09-03, 修回日期: 2009-10-10。

The change of CO₂ emissions was obviously related to soil temperature, but the change of N₂O emissions was obviously related to soil water content. So we concluded that the different soil fertility and crop growth under long-term different fertilization is an important factor to affect the soil CO₂, N₂O emissions; during the growth stages of wheat, soil respiration rate displayed an obvious seasonal curve. The emission of CO₂ was concentration on jointing stage and fallow period. The application of organic manure could improve the fertility of dry-land red soil, and maintained sustainable development of dry-land red soil, while the application of organic manure increased the soil respiration of CO₂ and N₂O emissions significantly.

Key words: long-term fertilization, red soil dry-land, CO₂, N₂O

0 引言

气候变暖是目前全球最重要的环境问题之一,其主要是由于大气中温室气体(CO₂、CH₄和N₂O等)浓度不断增加引起的,CO₂和N₂O被认为是最重要的温室气体,其中二氧化碳(CO₂)被认为是引起全球气候变暖的重要温室气体之一,而且大气中CO₂的浓度每年还在以0.5%的速度在递增^[1-4]。N₂O因其增温效应强,约是CO₂的150~200倍,并且N₂O能通过光化学反应,破坏臭氧层^[5],所以越来越受人们的重视。农田作为一种主要的土地利用方式是CO₂排放重要的源和汇^[2],同时土壤也是N₂O的重要来源,当前认为排放到大气中的N₂O有90%来自土壤^[6],农田N₂O排放增加时近几十年来大气N₂O浓度持续上升的主要原因之一。农田生态系统在温室气体排放中占很重要地位。农田管理措施,包括耕作、灌溉以及施肥等,通过影响土壤理化性状而影响温室气体的排放。对于不同施肥种类、不同施肥量、不同施肥方式、不同作物和不同水肥管理对温室气体排放影响已有很多研究^[1-4]。对于南方红壤地区土壤温室气体排放相关研究主要集中在稻田生态系统和红壤丘陵区林地^[7-11]。而对于南方红壤旱地长期不同施肥措施对农田土壤温室气体排放影响的研究相对较少。通过

测定长期不同施肥处理下红壤旱地的温室气体排放通量,研究长期不同施肥条件对红壤旱地农田土壤温室气体排放的影响,以期对南方红壤旱地农田生态系统土壤碳氮循环机制、环境气体减排和南方红壤旱地农田生态系统CO₂、N₂O排放量估算提供科学依据。

1 材料与与方法

1.1 试验设计

试验在湖南省祁阳县文富市镇中国农业科学院红壤实验站(N 26°45'12", E 111°52'32")内的国家红壤旱地肥力与肥料效益监测基地进行,供试土壤为第四纪红土发育的旱地红壤。选取了(1)对照不施肥(CK);(2)氮磷(NP);(3)氮磷钾(NPK);(4)常量氮磷钾+常量有机肥(NPKM);(5)增量氮磷钾+增量有机肥(1.5NPKM)5个处理进行测定,每个处理两次重复。该试验于1990年开始,小区面积200 m²,各小区之间用100 cm深水泥埂隔开,无灌溉设施,不灌水。笔者选取冬小麦的一个整生长期(2006—2007年度)进行测定,冬小麦于2006年11月6日施肥、播种,各处理肥料作基肥一次性施用,2007年5月10日收获。各处理的施肥量见表1,在有机肥料处理中,有机氮占70%,化肥氮占30%。

表1 不同处理施肥量

处理	尿素/(kg/hm ²)	过磷酸钙/(kg/hm ²)	氯化钾/(kg/hm ²)	猪粪/(kg/hm ²)
CK	0	0	0	0
NP	195	300	0	0
NPK	195	300	60	0
NPKM	58.5	300	60	12300
1.5NPKM	88.5	450	90	18450

1.2 采样方法和测定

气体样品采集用静态箱法,采气箱和采样框由PVC塑料制成。在箱顶中间部位有一硅胶塞制成的采气孔。采样框于小麦施肥前放置在小麦行间,插入土层深度为10 cm,采样框内无作物生长。田间采样从2006年11月开始至2007年10月结束;采样频率为施肥后7天内、降雨或灌溉后2~3天每天进行1次采

样;当温度<0℃,10天采集一次;其余时间一般一周采集2次。气体采样时,置采气箱于采样框上,并用水密封。用50 ml注射器从采集箱中部的采气孔处插入,来回抽动3次,使箱内气体混合均匀,再抽出20 ml气体注入体积为18 ml的抽成真空的真空瓶内。在采样箱放入采气框上后的第0、10、20 min和30 min分钟分别采样一次,每处理共采样4次,同时使用数字温度计

测定 5 cm 深土壤和大气温度。

气体样品 CO₂ 测定使用岛津气相色谱分析仪 (Shimadzu GC-14B) 分析 CO₂ 浓度, 检测器为热导检测器 (TCD), 载气为高纯氢。通过标准气体和待测气体的峰面积来计算待测气体浓度。N₂O 用岛津气相色谱分析仪 (Shimadzu GC-14B) 测定。检测器为 ⁶³Ni, 电子捕获检测器 (ECD)。色谱柱为 80/100 目 Porapak Q 的填充柱。进样器、检测器以及填充柱的温度分别为: 100 °C、300 °C 和 65 °C。氦甲烷为载气 (95% 氦气 + 5% 甲烷), 流速为 40 ml/min。高纯氮气作为反吹气。N₂O 的保留时间为 3.7 min。N₂O 标准气体由日本国家农业环境研究所提供。通过标准气体和待测气体的峰面积来计算待测气体的浓度。

通量的计算公式为: $F = \rho \times V / A \times \Delta c / \Delta t \times 273 / (273 + T)$

F 为排放通量, CO₂ 排放通量单位为 mg/(m²·h), N₂O 排放通量单位为 μg/(m²·h)。ρ 为标准状态下气体密度; V 是采集箱内有效空间体积 (m³); A 为采集箱覆盖的土壤面积 (m²); Δc 为气体浓度差; Δt 为时间间隔 (h); $\Delta c / \Delta t$ 通过 4 个采样点数据作图的斜率可知; T 为采样时箱内温度 (°C)。

1.3 数据处理

应用 Excel 和 SPSS 13.0 进行数据统计分析及作

图。

2 结果与讨论

2.1 小麦生长期 CO₂、N₂O 排放量的变化特征

2.1.1 小麦生长期 CO₂ 排放量的变化特征 由图 1 可见, 不同施肥处理冬小麦土壤 CO₂ 排放通量体现了一定的变化规律, 施肥后第 12 天出现第一次排放高峰, 而后逐渐降低, 到施肥后第 94 天出现第 2 次排放高峰。此后, 各处理的 CO₂ 排放均处在一较高水平, 排放高峰交替出现。第 1 次排放高峰出现在小麦出苗期, 第 2 次排放高峰出现在小麦分蘖期, 即在第 2 年的 2 月底至 3 月初, 南方已进入春季, 气温逐渐回升, 小麦植株个体进入旺盛生长期, 此后随着作物的地上和地下部分不断生长, CO₂ 排放通量随着作物的个体不断增大和气温的升高而逐渐增加^[12]。在作物收获之后的休闲期, CO₂ 的排放虽有下降的趋势, 但仍处于比较高的状态, 据前人的研究^[13], 土壤 CO₂ 释放量的多少主要是微生物活动强弱直接相关。休闲期的气温维持在 28~33 °C 之间, 降雨量为 646.7 mm, 占当年降雨量的 61.3%, 给土壤微生物活动提供了适宜的土壤水分、温度, 土壤微生物的活性加快, 增加了土壤中残留的作物根系等有机质分解, 土壤呼吸量增加。

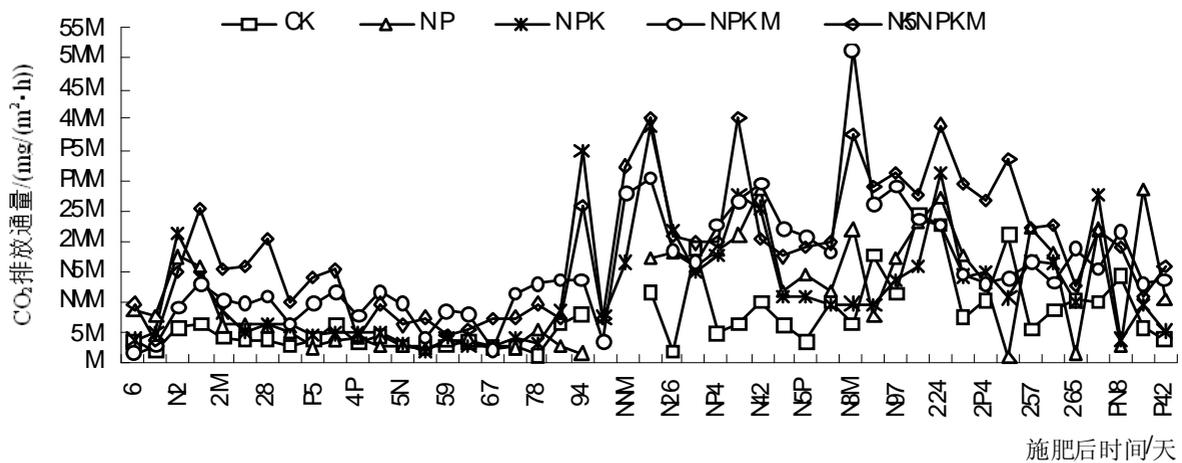


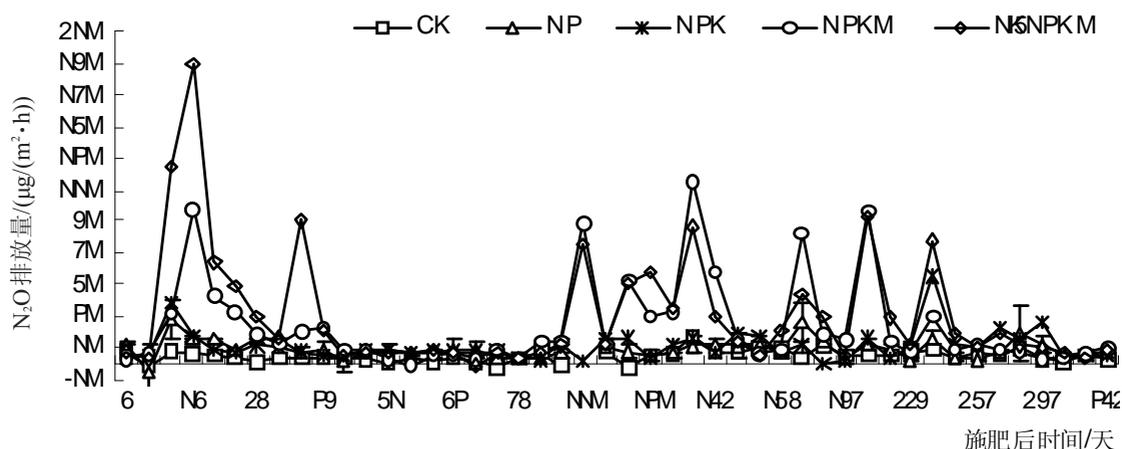
图 1 小麦季 CO₂ 排放通量季节变化变化

2.1.2 小麦生长期 N₂O 排放量的变化特征 由图 2 可见, N₂O 排放通量随时间变化很大, 处理之间的差异也很明显。除对照不施肥 (CK) 之外, 其余各处理均在施肥后第 16、35、110、138、180、208、234 天出现排放高峰。第一个高峰的出现在小麦的萌芽期, 因为当时降雨过后小麦开始萌芽, 有合适的土壤湿度, 施肥后短时间内表层土壤氮素含量较高。这一现象与前人的研究结果相似^[14]。此后各处理的 N₂O 排放通量大部分时间处于较低值, 随后出现的几个 N₂O 排放高峰均出现在

降雨之后。前人研究表明水分是影响氧化亚氮排放最重要的因素之一^[15], 土壤的干湿交替激发了 N₂O 的产生和排放。

2.2 不同施肥处理对小麦季 CO₂ 和 N₂O 排放通量的影响

2.2.1 不同施肥处理对小麦季 CO₂ 排放通量的影响 在红壤旱地上, 由于长期不同施肥处理, 土壤性质发生明显不同的变化, CO₂ 排放通量也发生了明显的变化, 土壤 CO₂ 排放通量的大小变化为: 1.5NPKM > NPKM >

图2 小麦季N₂O排放通量季节变化

NPK>CK>NP。各处理土壤呼吸CO₂年累积排放量在8284.02~15863.48 kg/hm²之间,且1.5NPKM、NPKM两个处理的土壤呼吸CO₂排放通量为高,基本维持在一个较高水平,下降趋势也比其他处理慢。NP、NPK两个处理间的CO₂排放通量差异不显著,这两个处理的CO₂排放通量与NPKM、1.5NPKM相比较,都有显著差异($P<0.05$),但NPKM和1.5NPKM之间差异不显著。说明有机肥的施入能显著提高土壤呼吸CO₂的排放通量,这主要是由于有机肥的施用增加了土壤中微生物数量,同时1.5NPKM、NPKM两个处理的地表温度在相同情况下比其他处理升温快,此变化趋势与前人^[16-17]的研究结果相似:地表温度主要影响土壤中微生物的活动,在低于34℃温度范围内,温度越高,土壤微生物的活动越强烈,呼吸作用愈强烈,从而影响土壤中CO₂

的产生;另外气温也影响植物的呼吸作用,白天随着温度的升高,植物的光合作用增强,与其密切相关的呼吸作用也增强,释放出较多的CO₂。并且长期施入有机肥的两个处理(NPKM、1.5NPKM),作物长势明显比其他各处理(CK、NP、NPK)要好,植物呼吸作用更强烈。

为了进一步比较不同处理之间CO₂的排放差异,表2显示各处理CO₂在小麦不同生长时期的累计排放量及其排放量占年排放量的比例。由表2可见,各处理土壤呼吸CO₂排放主要集中在拔节期和休闲期,在这两个时期,CK、NP、NPK、NPKM、1.5NPKM的CO₂排放量占年排放量的比例分别达到89.32%、83.17%、80.96%、74.79%、89.61%,可见,CO₂排放量随着作物个体生长和气温升高而增加,同时作物收获之后的休闲期土壤CO₂的排放量也不容忽视。

表2 小麦不同生长期CO₂排放量占麦季排放量的比例

处理	苗期		拔节期		穗期、成熟期		休闲期	
	CO ₂ 排放量/(kg/hm ²)	占总比例/%						
CK	806.83 a	8.96	849.45 a	21.62	213.16 a	9.65	7681.06 a	59.77
NP	1120.27 b	10.71	1805.60 b	39.54	344.13 b	13.4	5429.00 b	36.35
NPK	1676.41 b	13.92	2452.75 d	46.67	208.55 a	7.05	5562.04 b	32.36
NPKM	1920.64 b	13.53	2156.45c	34.82	788.07 c	22.62	5881.20 c	29.03
1.5NPKM	2670.64 c	14.61	3029.67 d	37.98	665.71 d	14.84	8497.85 d	32.57

2.2.2 不同施肥处理对小麦季N₂O排放通量的影响 土壤N₂O平均排放通量大小顺序为1.5NPKM>NPKM>NPK>NP>CK,各处理土壤N₂O年累积排放量在0.37~2.04 kg/hm²之间,占全年施氮量的0.26%~1.45%。图3为各处理在小麦不同生长期内的N₂O累积排放量。由图3可见,NP、NPK、NPKM、1.5NPKM与CK相比,整个生育期N₂O累积排放量分别增加了88.3%、129.0%、347.2%和450.2%,氮肥的施用显著增加了

N₂O的排放量($P<0.05$)。不同施肥方式明显影响N₂O的排放,与施用化肥的处理(NP、NPK)相比,有机肥的施用(NPKM、1.5NPKM)显著增加了N₂O的排放($P<0.05$)。在化肥和有机肥均增加50%用量的条件下,即1.5NPKM与NPKM相比较,N₂O排放增加了22.90%。有机肥和化肥的过量使用,都会导致土壤N素积累。从而增加土壤中N素反硝化作用产生N₂O的排放^[17-19]。从N₂O排放量变化趋势看出,N₂O排放主要集中在小麦

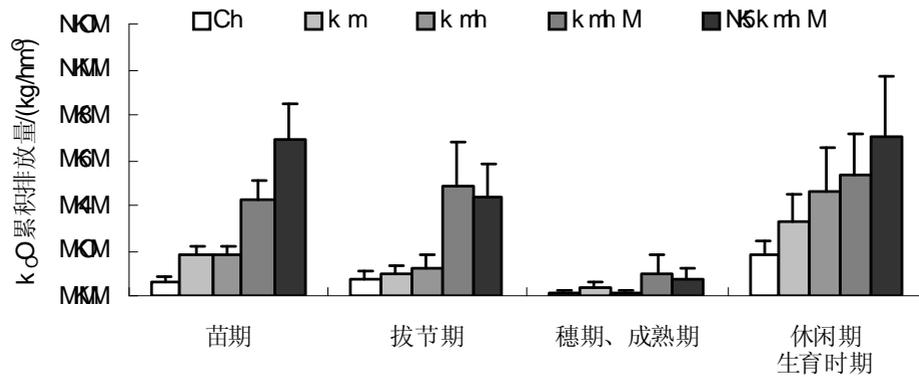


图3 各处理麦季N₂O累积排放量

苗期和拔节期,在这两个时期,NPKM、1.5NPKM两个处理的N₂O累积排放量分别达到0.92、1.12 kg/hm²,分别占到整个生长期排放量的58.67%、58.89%;在小麦穗期、成熟期,不同施肥处理的N₂O累积排放均最低;在休闲期,不同施肥处理的N₂O累积排放量相对较大,这一时期N₂O累积排放量分别达到0.19、0.33、0.47、0.54、0.71 kg/hm²。出现这种情况,是由于休闲期的时间跨度比较长,作物收获后留下的根茬具有一定活性,未被作物所利用的残留于土壤氮素等,能够给土壤的反硝化作用形成提够比较丰富的基质,因此在作物收获后的休闲期N₂O的排放量数量相对较多。

2.3 土壤温度和水分对小麦季CO₂、N₂O排放的影响

相关分析表明(表3),不同施肥处理小麦季CO₂排放通量与土壤水分含量之间相关性不显著,而处理CK、NP、NPK、NPKM、1.5NPKM的CO₂排放通量均与土壤温度之间体现了显著的相关性(P<0.05)。以往相关研究表明^[16,20],CO₂排放通量随着土壤温度的升高而增加,主要是由于气温逐渐升高,土壤呼吸加剧,土壤微生物活性增强,从而影响土壤CO₂的排放。土壤水分虽然对作物和土壤微生物有一定的影响,但只要土壤不处于缺水情况下,对作物和土壤微生物影响相对

较小,当土壤水分含量过高时还会影响土壤通气性能,对作物和土壤微生物活动有抑制作用,同时CO₂排放主要是作物和土壤呼吸释放而出,故土壤水分含量对CO₂排放关系表现不明显。

对N₂O排放量与温度和土壤水分进行相关分析,长期施用有机肥的两个处理NPKM、1.5NPKM,小麦季N₂O排放通量与土壤水分含量之间存在显著正相关(P<0.05),而与土壤温度之间相关性不明显;CK、NP、NPK等3个处理小麦季N₂O排放通量与土壤水分含量和土壤温度之间均未表现出显著相关性。旱地农田土壤N₂O产生途径取决于土壤水分状况,土壤水分含量是影响N₂O产生和排放的重要因素^[21]。N₂O排放是反硝化过程,反硝化发生的首要条件是土壤处于厌气状况,同时要有反硝化的本底物质。在施用有机肥的处理(NPKM、1.5NPKM),小麦长势较好,地上部生长旺盛,根系发达,根系吸收土壤氧能力相对较强,土壤结构好,毛管空隙多,产生反硝化几率大,同时土壤水分多时,反硝化本底物质运移畅通,故N₂O排放量与土壤水分关系密切;而在CK、NP、NPK处理中,小麦生长差,土壤结构性差,故N₂O排放量与土壤水分关系不密切。

表3 CO₂、N₂O排放量与地温、土壤含水量之间相关系数

处理	CO ₂ 排放相关系数		N ₂ O排放相关系数	
	Flux-SWC	Flux-ST5cm	Flux-SWC	Flux-ST5cm
CK	0.045	0.544**	-0.001	0.244
NP	0.131	0.454**	0.307	0.06
NPK	0.131	0.432**	0.084	0.195
NPKM	0.218	0.314**	0.545**	0.185
1.5NPKM	0.127	0.467**	0.460**	-0.048

注:**表示在P<0.01水平上的显著性;Flux:排放通量,SWC:土壤水分;ST:土壤温度。

3 结论与讨论

(1)红壤旱地小麦季CO₂和N₂O排放均具有明显的季节变化规律。CO₂的排放量随着作物的个体生长

而增加,土壤CO₂排放主要集中在拔节期和休闲期,不同处理土壤CO₂的排放与5cm的地温表现出好的相关性。N₂O的排放高峰基本上出现在降雨后,土壤的

干湿交替促进了土壤N₂O的排放,施用了有机肥的处理,土壤N₂O的排放与土壤含水量之间表现出好的相关性。

(2)土壤呼吸CO₂排放通量的大小变化为:1.5NPKM>NPKM>NPK>CK>NP,长期施用有机肥能显著增加土壤呼吸CO₂的排放通量,增量有机肥施用即1.5NPKM与NPKM之间的CO₂排放通量差异不显著。各处理土壤呼吸CO₂排放主要集中在拔节期,并且休闲期的CO₂排放不能忽视。

(3)不同施肥处理对土壤N₂O平均排放通量的影响:1.5NPKM>NPKM>NPK>NP>CK,长期不同施肥表明,单施化肥、化肥有机肥配合施用均能显著增加土壤N₂O的排放。不同施肥处理土壤N₂O年累积排放量在0.37~2.04 kg/hm²之间,占全年施氮量的0.26%~1.45%。红壤旱地长期不同施肥处理表明,有机肥的配合施用是提升红壤旱地肥力、维持红壤旱地可持续发展的关键,但怎样降低有机肥施用对土壤N₂O和CO₂排放的影响还有待进一步研究。

参考文献

- [1] 曾江海,王智平,张玉铭,等.小麦-玉米轮作期土壤排放N₂O通量及总量估算[J].环境科学,1995,16(1):32-35,67.
- [2] 王立刚,邱建军,李维炯.黄淮海平原地区夏玉米农田土壤呼吸的动态研究[J].土壤肥料,2002,(6):13-17.
- [3] 秦晓波,李玉娥,刘克樱,等.不同施肥处理对稻田氧化亚氮排放的影响[J].中国农业气象,2006,27(4):273-276.
- [4] 黄树辉,吕军.农田土壤N₂O排放研究进展[J].土壤通报,2004,35(4):516-522.
- [5] 李海防,夏汉平,熊燕梅,等.土壤温室气体产生与排放影响因素研究进展[J].生态环境,2007,16(6):1781-1788.
- [6] 杨兰芳,蔡祖聪,祁士华.大豆和玉米生长对土壤N₂O排放的影响[J].作物学报,2007,33(5):861-865.
- [7] 邹建文,黄耀,宗良纲,等.不同种类有机肥施用对稻田CH₄和N₂O排放的综合影响[J].环境科学,2003,24(4):7-12.
- [8] 沈艳,缪启龙,刘允芬.亚热带红壤丘陵人工混交林区CO₂源汇及变化[J].生态学报,2005,25(6):1371-1375.
- [9] 周志田,成升魁,刘允芬,等.中国亚热带红壤丘陵区不同土地利用方式下土壤CO₂排放规律初探[J].资源科学,2002,24(2):83-87.
- [10] 谢小立.南方红壤地区稻田甲烷排放量及其机制的研究简报[J].农业现代化研究,1992,13(6):381-384.
- [11] 丁洪,王跃思,项虹艳,等.福建省几种主要红壤性水稻土的硝化与反硝化活性[J].农业环境科学学报,2003,22(6):715-719.
- [12] 乔云发,苗淑杰,王树起,等.不同施肥处理对黑土土壤呼吸的影响[J].土壤学报,2007,44(6):1028-1035.
- [13] 麦克拉伦 A·D., 波得森 G H., 丁斯库金斯,等.土壤生物化学[M].北京:农业出版社,1984:490-491.
- [14] 丁洪,王跃思,项虹艳,等.玉米-小麦轮作系统中氮肥反硝化损失与N₂O排放量[J].农业环境科学学报,2003,22(5):557-560.
- [15] 田光明,何云峰,李永先.水肥管理对稻田土壤甲烷和氧化亚氮排放的影响[J].土壤与环境,2002,11(3):294-298.
- [16] 张中杰,朱波,江长胜,等.川中丘陵区旱地小麦生态系统CO₂、N₂O和CH₄排放特征[J].生态学杂志,2005,24(2):131-135.
- [17] 张金霞,曹广民,周党卫,等.退化草地暗沃寒冻锥形土CO₂释放的日变化和季节动态[J].土壤学报,2001,38(1):32-40.
- [17] 曹志洪.施肥与大气环境质量——论施肥对环境的影响(1)[J].土壤,2003,35(4):265-270.
- [18] 王效科,李长生.中国农业土壤N₂O排放量估算[J].环境科学学报,2000,20(4):483-488.
- [19] Luo Tianxiang, Li Huixin, Wang Tong, et al. Influence of nematodes and earthworms on the emissions of soil trace gases (CO₂, N₂O) [J]. Acta Ecological Sinica,2008,28(3):993-999.
- [20] 王重阳,郑靖,顾江新,等.下辽河平原大豆田CO₂和N₂O排放通量及相关影响因素研究[J].土壤,2006,38(6):708-711.
- [21] 马静,徐华,蔡祖冲,等.稻季施肥管理措施对后续麦季N₂O排放的影响[J].土壤,2006,38(6):687-691.