

何志龙, 周 维, 田亚男, 等. 中亚热带丘陵区茶园和林地土壤春季 N_2O 排放及其影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1210–1217.

HE Zhi-long, ZHOU Wei, TIAN Ya-nan, et al. Nitrous oxide emission and its impact factors in tea garden and woodland soils in subtropical hilly region of China during spring season[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6): 1210–1217.

中亚热带丘陵区茶园和林地土壤 春季 N_2O 排放及其影响因素

何志龙, 周 维, 田亚男, Muhammad Shaaban, 林 杉*

(华中农业大学资源与环境学院/农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070)

摘 要: 中亚热带地区春季降雨频繁, 茶园施肥量大, 该季节茶园土壤氧化亚氮(N_2O)排放量较高, 研究春季茶园土壤 N_2O 排放及其影响因子有一定意义。以中亚热带丘陵区土壤为对象, 采用静态箱-气相色谱法, 研究了两种茶年限茶园和林地土壤春季 N_2O 排放特征及其影响因子。结果表明: 茶园 N_2O 排放量明显高于林地, 50 年茶园 N_2O 排放量明显高于 20 年茶园, 林地 N_2O 的排放量最少; 50 年茶园、20 年茶园和林地土壤春季 N_2O 累积排放量分别为 2.07、1.39、0.22 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。两种植茶年限茶园土壤 N_2O 排放通量均与土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量呈显著正相关($P < 0.05$), 林地土壤 N_2O 排放通量则与土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量呈极显著正相关关系($P < 0.01$); 茶园和林地土壤 N_2O 排放通量均与 5 d 累积降雨量之间存在显著的相关性。多元逐步回归分析显示, 茶园土壤 N_2O 排放通量受土壤温度和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量影响, 共同解释其 48%~49% 的变化; 林地土壤 N_2O 排放通量受土壤温度和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量影响, 共同解释其 55% 的变化。这项研究显示施肥对春季茶园 N_2O 排放的促进作用与降雨有关。

关键词: 茶园; 氧化亚氮排放; 矿质态氮; 温度; 降雨量

中图分类号: X511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2016)06-1210-08 doi:10.11654/jaes.2016.06.026

Nitrous oxide emission and its impact factors in tea garden and woodland soils in subtropical hilly region of China during spring season

HE Zhi-long, ZHOU Wei, TIAN Ya-nan, Muhammad Shaaban, LIN Shan*

(College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Arable Land Conservation in Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture, Wuhan 430070, China)

Abstract: In the central subtropical region of China, more rain events and higher fertilization rates make tea field soil become a larger source of N_2O emissions in the spring season. Therefore, it is necessary to investigate soil N_2O fluxes and related influencing factors under tea field in spring. This study measured the N_2O emission characteristics and environmental factors of soils from tea fields with two plantation ages in a hilly region, using static chamber and gas chromatography technique. At the same time, N_2O emissions in woodland were also measured. Results showed that the highest cumulative N_2O emission (2.07 $\text{kg} \text{ N}_2\text{O}-\text{N} \cdot \text{hm}^{-2}$) was observed in the tea field of 50 years of plantation during the experimental period (spring), followed by the tea field (1.39 $\text{kg} \text{ N}_2\text{O}-\text{N} \cdot \text{hm}^{-2}$) of 20 years of plantation. The lowest cumulative N_2O emission (0.22 $\text{kg} \text{ N}_2\text{O}-\text{N} \cdot \text{hm}^{-2}$) was found in the woodland. Soil N_2O flux had a significant positive correlation with soil $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration under tea field of two plantation ages ($P < 0.05$), whereas soil N_2O flux was significantly correlated with soil $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentration in woodland ($P < 0.01$). The cumulative precipitation during the previous five days was found to be significantly correlated with soil N_2O fluxes under both tea field and woodland ($P < 0.05$). Stepwise regression analysis showed that 48%~49% of the variability in the N_2O flux from tea field

收稿日期: 2015-12-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201255, 41171212); 教育部创新团队课题(IRT1247); 河南省农业科学院自主创新专项基金

作者简介: 何志龙(1991—), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 主要从事农田温室气体研究。E-mail: 1940923418@qq.com

* 通信作者: 林 杉 E-mail: linshan@mail.hzau.edu.cn

soil could be explained by NO_3^- -N concentration and soil temperature, while 55% of the variability in the N_2O flux from woodland soil could be explained by the concentration of NH_4^+ -N and soil temperature. These results indicate that fertilizer induced N_2O fluxes from tea field soils is related with rain events during the spring period.

Keywords: tea garden; N_2O emission; mineral nitrogen; temperature; rainfall

氧化亚氮(N_2O)是除二氧化碳(CO_2)和甲烷(CH_4)以外的第三大温室气体,由于其增温潜势大、大气滞留时间长、破坏臭氧能力强等特点而备受关注^[1]。尽管 N_2O 相对于 CO_2 来说浓度低、增长率小,但其百年增温潜势是 CO_2 的296倍,是 CH_4 的13倍^[2]。目前大气中 N_2O 浓度持续上升,已经达到了 $325.1 \text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$,比工业革命前增加了20%^[3]。土壤微生物硝化反硝化作用的释放是大气中的 N_2O 主要来源之一,而在自然状况下由于受土壤中氮素的限制, N_2O 排放量有限。人类的活动导致土壤氮素水平增加,土壤 N_2O 排放量大幅增加,据估计,大气中70%的 N_2O 来自土壤,农田土壤更是全球 N_2O 最主要的排放源^[4]。

茶树主要分布在亚热带丘陵地区,属于多年生常绿植物,是我国重要的经济作物。春季是茶树生长和采摘最重要的季节,茶农为提高茶叶年产量和品质,一般在春季大量施肥,加上春季降雨量大和气温较高,造成春季茶园土壤 N_2O 排放较高。受施肥管理措施和茶树生长等因素的影响,不同植茶年限茶园土壤性质一般不同^[5],因而不同植茶年限茶园 N_2O 排放及影响因子存在差异。当地茶园达到一定植茶年限后就会改种树木,香樟树和马尾松是当地广泛改种的两种树。因此,本文以湖北咸宁红壤丘陵区土壤为对象,研究春季期间50年茶园、20年茶园和樟树-马尾松混交林林地土壤 N_2O 排放特征,并探讨影响茶园和林地土壤 N_2O 排放的重要环境因子,为编制园林地土壤 N_2O 排放清单提供可靠数据,以期制定减少茶园氮素损

失和 N_2O 排放的有效措施提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于湖北省咸宁市($29^\circ02'\sim30^\circ18'\text{N}$, $113^\circ31'\sim114^\circ58'\text{E}$)贺胜桥镇。该地属于中亚热带丘陵区,年平均降水量1577.4 mm。本实验分别选取当地植茶年限为45~55年、20~25年和茶园附近的樟树-马尾松混交林林地(W)作为研究样地,2种植茶年限的样地分别记为50年(50 a)和20年(20 a)。

观察期从2013年2月初开始至5月底结束,共102 d。按当地习惯,每次施肥时开5~10 cm深沟将肥料施入后覆土。茶园分别于3月7日施尿素,4月2日施尿素+鸡粪,5月4日施尿素,施氮量分别为100、150、50 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。林地为樟树-马尾松混交林,地面长有杂草,树龄10~15年,林地不施肥。降雨量的资料从咸宁红壤综合试验站内的气象站获得,观测期采样点降雨量的季节性变化如图1。5月份的降雨量较大,占整个观察期间降雨量的41%。

1.2 样品采集

1.2.1 气体的采集

采用静态箱法,气体采样箱为圆形不锈钢圆筒,高25 cm,直径20 cm。采样箱箱盖上有两个孔分别固定有玻璃管,其中一根连接一密封气袋置于箱内,用来调节采样箱内的压强,另一根连接一带有三通阀的橡胶管用来采集气体。在50年茶园、20年茶

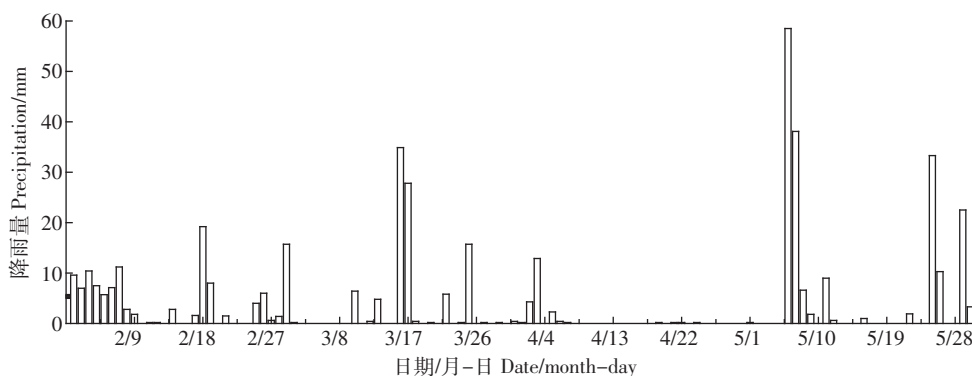


图1 采样期间降水量变化

Figure 1 Dynamics of precipitation during experimental period

园和林地中各安放3个采样箱,按相同方法重复采样三次。采样前,去除土壤表层凋落物,将采样箱垂直插入土壤表面以下5 cm并将箱周围压实,以防漏气。茶园采样箱置于茶树行间,林地采样箱置于树木之间,相互间隔2~3 m,每隔5~8 d采样一次。用注射器先抽取采样箱上空大气气样作为空白对照,隔20 min抽取箱内气体,将抽取的气体转移到真空玻璃瓶中。在采集气体样品的同时测定采样点土壤表层5 cm处的地温。采样时间设定在上午09:00—11:00之间。

1.2.2 土样的采集

每次气体采样时采集0~20 cm土层土样,去除杂质混均后带回实验室。每种土取3个平行,置于烘箱中烘至恒重,测定土壤含水量,其余土壤鲜样于4℃保存,用于测定土壤铵态氮和硝态氮等指标。实验开始前对土壤pH、容重和全氮含量等指标进行了测定。土壤基本理化性质如表1。

1.3 数据计算与统计

N_2O 的排放通量和累积排放量按照Myles等^[6]提出的方法计算。

土壤含水量以土壤孔隙含水量(WFPS)表示,计算方法如下:

$WFPS = (\text{土壤重量含水量} \times \text{土壤容重}) / \text{土壤总孔隙度} \times 100\%$

式中:土壤总孔隙度=1-土壤容重/2.65。

所有实验结果均以3次重复的平均值±标准误差表示。实验数据用Excel软件进行处理,用SPSS16.0软件进行相关分析,采用Pearson方法分析环境因子与 N_2O 排放通量之间的相关性,显著性水平 $P=0.05$,逐步回归分析影响 N_2O 排放的主要环境因子。采用Origin8.0软件绘图。

2 结果与分析

2.1 茶园和林地土壤的性质

茶园和林地土壤的性质有一定的差异(表1)。茶园土壤pH值低于林地,土壤的全碳含量在50年茶

园中最高(24.20 g·kg⁻¹),林地中最低(19.79 g·kg⁻¹)。在观测期间,5 cm土壤温度的变化趋势基本一致,三块实验样地土壤孔隙含水量(WFPS)无显著差异(图2),其变化主要受降雨影响。两种植茶年限茶园土壤矿质氮(NO_3^- -N和 NH_4^+ -N)含量主要受施肥影响,3月7日、4月2日和5月4日施肥后 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N含量均显著提高(图2);而林地土壤矿质氮含量的变化无明显的规律性,在整个观测期处于较低水平。

2.2 土壤氧化亚氮排放

茶园 N_2O 排放通量随时间有较大的变化(图3)。受施肥的影响,茶园在3月7日和5月4日两次施肥后 N_2O 排放量逐渐增高,于5月9日观测到排放峰值。这是由于5月份温度较高,5月9日前出现了强降雨,施肥后降雨的激发效应所致。4月份茶园土壤 N_2O 排放较高,因为茶园于4月初施有机肥,土壤矿质氮含量维持在较高水平,硝化、反硝化作用有充足的反应底物。春季林地土壤 N_2O 排放变化不明显,在温度和降雨量较低的2月份观测到吸收值,而在温度和降雨量较高的5月份有一定的排放。

春季茶园和林地土壤 N_2O 累积排放量差异较大(图4)。本研究中,50年、20年茶园和林地土壤春季 N_2O 累积排放量分别为2.07、1.39 kg N_2O -N·hm⁻²和0.22 kg N_2O -N·hm⁻²,两种茶园土壤 N_2O 累积排放量均显著高于林地。不同植茶年限的茶园之间 N_2O 累积排放量也存在显著差异,50年茶园土壤 N_2O 排放显著高于20年茶园。

2.3 影响土壤 N_2O 排放的主要土壤因子

采用SPASS16.0软件分析 N_2O 排放与各种环境因子之间的相关性(表2)。温度对茶园和林地土壤 N_2O 排放均有影响,50年茶园和林地土壤的 N_2O 排放通量与5 cm土壤温度呈显著正相关($P<0.05$),20年茶园 N_2O 排放通量与5 cm土壤温度虽呈正相关,但相关性不显著($P=0.068$)。土壤 NH_4^+ -N含量和含水量(WFPS)对林地土壤 N_2O 排放均有显著影响,二者之间呈显著的正相关关系($P<0.05$),相关系数分别为

表1 供试样地0~20 cm土层土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical-chemical properties of surface(0~20 cm) soils

样地类型编号 Sample number	pH (H ₂ O)	容重 Bulk density/ g·cm ⁻³	全碳 Total C/ g·kg ⁻¹	全氮 Total N/ g·kg ⁻¹	C/N	机械组成 Mechanical composition/%		
						砂粒 Sand	粉粒 Powder	粘粒 Clay
50 a	4.44	1.314 1	24.20	1.37	17.66	58.6	25.2	16.2
20 a	4.51	1.395 4	20.67	1.27	16.27	56.4	28.4	15.2
W	4.52	1.208 8	19.79	1.57	12.60	29.8	60.3	9.9

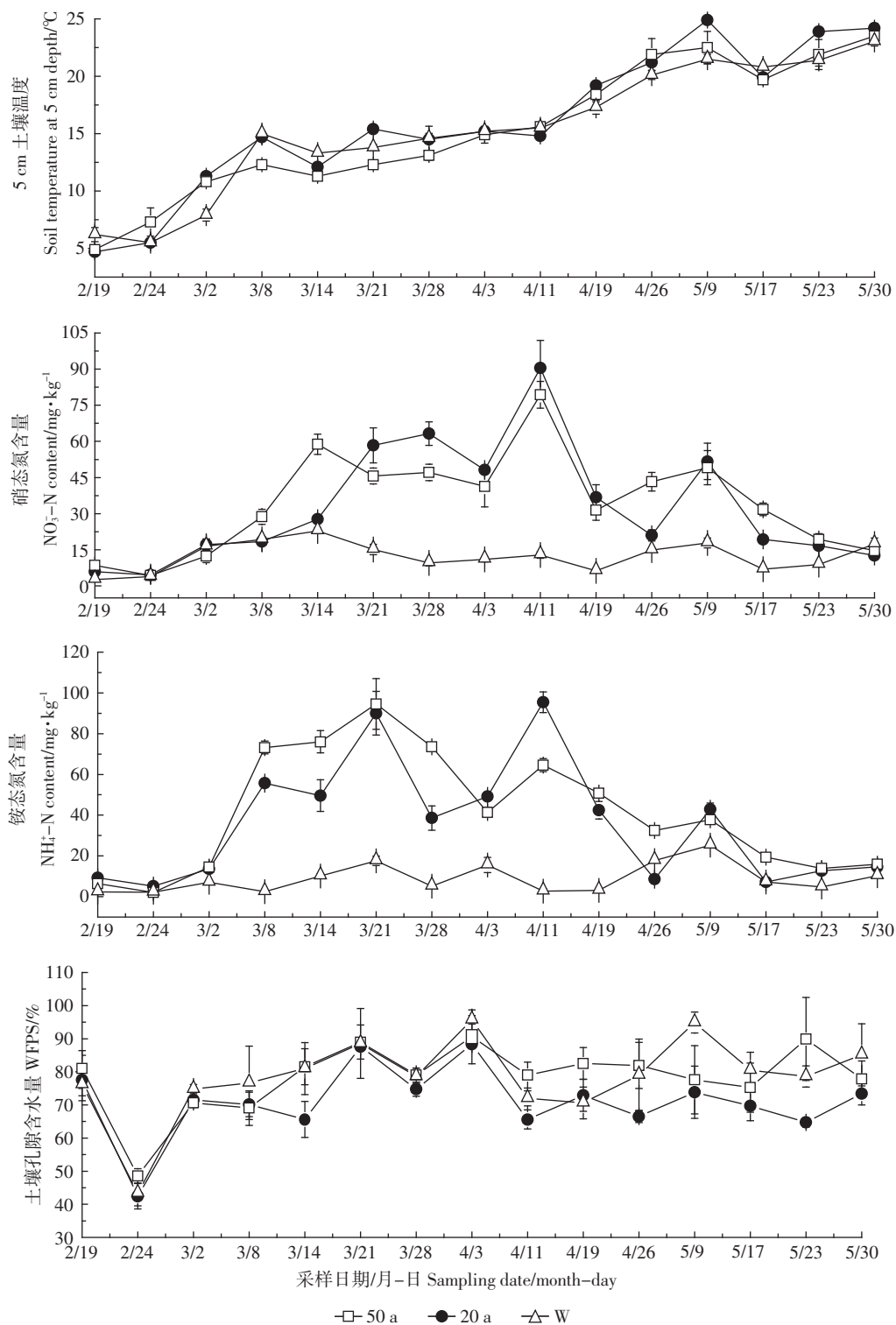


图 2 观察期间茶园和林地土壤环境因子变化

Figure 2 Changes of soil environmental factors in tea garden and woodland during experimental period

0.686 和 0.595; 土壤 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 对两种茶园土壤 N_2O 排放均有显著影响 ($P < 0.05$), 50 年和 20 年茶园的相关系数分别为 0.633 和 0.635。

土壤 N_2O 产生和排放的机制较复杂, N_2O 排放受

不同的环境因子互相影响, 为消除各影响因子间的相互作用, 利用逐步回归方法对 5 cm 土壤温度、 $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 、土壤孔隙含水量等因子对 N_2O 通量的影响进行分析, 方程为:

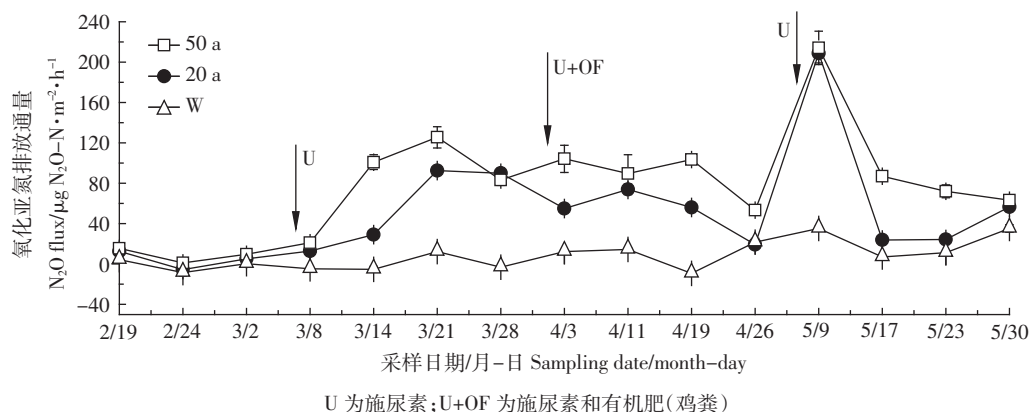


图3 观察期间茶园和林地土壤氧化亚氮排放通量变化

Figure 3 Changes of N_2O fluxes in tea garden and woodland during experimental period

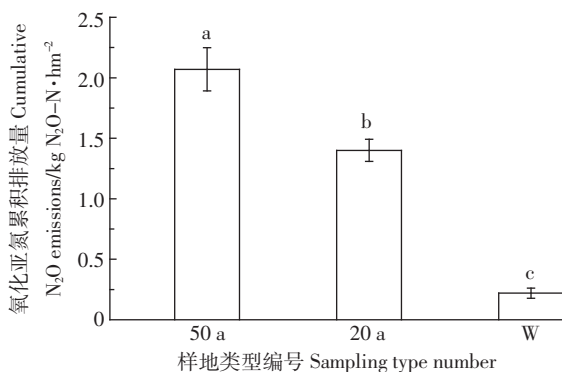


图4 茶园和林地春季氧化亚氮累积排放量

Figure 4 Cumulative emissions of nitrous oxide in tea garden and woodland in spring

表2 茶园和林地氧化亚氮排放与环境因子的相关性

Table 2 Correlation between N_2O emissions and environmental factors in tea garden and woodland

样地类型 编号 Sample	5 cm 土壤温度 Soil temperature at 5 cm depth	铵态氮 NH_4^+-N	硝态氮 $NO_3^- - N$	土壤孔隙含 水量 WFPS
50 a	0.526*	0.388 ^{NS}	0.633*	0.461 ^{NS}
20 a	0.483 ^{NS}	0.446 ^{NS}	0.635*	0.388 ^{NS}
W	0.636*	0.686**	0.316 ^{NS}	0.595*

注:**表示相关性极显著($P<0.01$);*表示相关性显著($P<0.05$);NS表示相关性不显著($P>0.05$)。

$$y = ax_1 + bx_2 + cx_3 + dx_4 + e$$

式中: y 为 N_2O 通量; x_1 为5 cm 土壤温度, $^{\circ}C$; x_2 为 NH_4^+-N 含量, $mg \cdot kg^{-1}$; x_3 为 $NO_3^- - N$ 含量, $mg \cdot kg^{-1}$; x_4 为土壤孔隙含水量(WFPS),%。

逐步回归拟合剔除对 N_2O 影响不显著的因子(表3)。结果表明,5 cm 土壤温度和 $NO_3^- - N$ 含量是影响茶

园土壤 N_2O 通量的主要因子;而对于林地,5 cm 土壤温度和 NH_4^+-N 是主要因子。可见5 cm 土壤温度是两种利用方式下土壤 N_2O 排放的共同影响因子。

从回归方程决定系数(R^2)来看,茶园5 cm 土壤温度和 $NO_3^- - N$ 含量能说明 N_2O 排放通量的48%~49%;林地5 cm 土壤温度和 NH_4^+-N 含量能说明 N_2O 排放通量的55%。

表3 N_2O 排放通量与5 cm 土壤温度、WFPS、铵态氮、硝态氮含量的逐步回归方程参数

Table 3 Parameters of stepwise regression equation for N_2O fluxes against soil temperature, WFPS, ammonium, and nitrate content

样地类型 编号 Sample	方程参数 Equation parameters					统计参数 Statistic parameters		
	a	b	c	d	e	R^2	F	P
50 a	4.083	NS	1.522	NS	-37.781	0.487	7.635	0.007
20 a	3.353	NS	1.240	NS	-44.322	0.479	7.425	0.008
W	1.070	1.022	NS	NS	-17.519	0.551	9.602	0.003

注: a, b, c, d 为偏回归系数, e 为常数, R^2 为判定系数, F 为方差分析, P 为相关概率;某因子进入逐步回归方程的标准为 $P<0.05$,NS表示此参数对应的因子在逐步回归方程中对因变量的影响不显著($P>0.05$),其余参数对因变量的影响均达显著水平($P<0.05$)。

2.4 土壤 N_2O 排放与降雨量的关系

土壤 N_2O 排放通量与采样前5 d 累积降雨量之间的关系如图5所示。茶园和林地土壤 N_2O 排放通量与5 d 累积降雨量之间都呈显著正相关关系,说明在观测期内降雨量越高,土壤 N_2O 排放通量也越高。当采样前的5 d 累积降雨量为105 mm时,50年和20年茶园 N_2O 排放通量均最高(图5);当累积降雨量最高时,同时也观测到林地土壤 N_2O 排放通量的较高值。这说明降雨是影响该地区茶园和林地土壤 N_2O 排

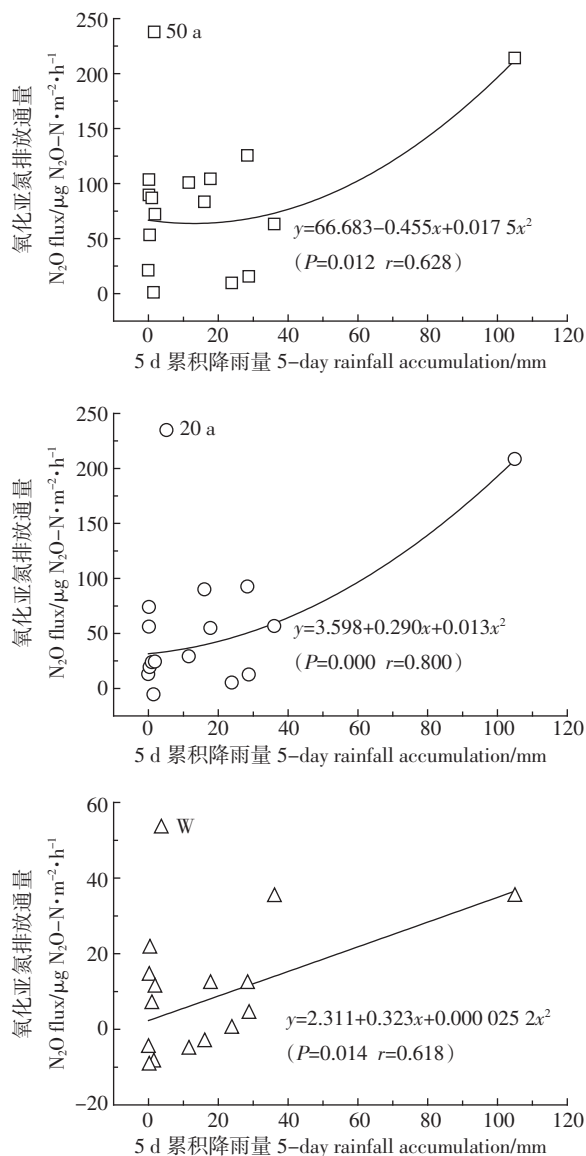


图5 茶园和林地氧化亚氮排放通量与5 d累积降雨量之间的关系

Figure 5 Relationship between N₂O flux and cumulative rainfall of five days in tea garden and woodland

放的重要因素。

3 讨论

氮肥是土壤 N₂O 排放的主要影响因子之一。两种植茶年限的茶园土壤 N₂O 排放量均显著高于林地,与茶园施肥量较大有关。为了提高春茶质量,茶园普遍存在春季大量施用氮肥的现象,从而造成茶园土壤氮素的积累^[7]。观测期间,茶园土壤中矿质氮含量是林地土壤中矿质氮含量的3倍。Hoben 等^[8]和 Ma 等^[9]的研究发现 N₂O 排放量随着施氮量的增加而上升,Ze-barth 等^[10]的研究得出施用氮肥提高了麦田春季 N₂O

排放,Burton 等^[11]在马铃薯地的研究也指出氮肥的施用显著促进 N₂O 的累积排放量。本实验的结果与前人一致,大量施入氮肥会增加土壤中 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量,为硝化反硝化作用提供充足的反应底物,从而引起较高的 N₂O 排放量^[12]。土壤中多数微生物都是以有机质作为碳源和电子供体,土壤有机质的含量影响着土壤 N₂O 的排放^[13]。本实验中 50 年茶园 N₂O 排放量显著高于 20 年茶园,与 50 年茶园土壤有机碳含量较高有关。由于茶树的生长特性,一般认为植茶年限较长的茶园土壤有机碳含量较高^[14],本研究中 50 年茶园土壤全碳含量比 20 年茶园土壤全碳含量高 17.1%(表 1)。李睿达等^[15]的研究表明土壤有机碳能显著促进 N₂O 排放,且排放通量随着有机碳含量的增高而增高。Jäger 等^[16]的实验也得出外源有机碳的输入显著促进土壤 N₂O 排放。有机碳为土壤中微生物的生长繁殖提供碳源,激活土壤微生物的呼吸作用,加快土壤氧的消耗和土壤厌氧环境的形成,间接增强了反硝化微生物的活性^[17]。

土壤 N₂O 的排放主要由微生物硝化反硝化作用产生,而硝化反硝化过程受土壤碳氮含量、含水量和 pH 等性质的影响^[18],因而不同土壤产生 N₂O 的途径不一致。春季两种茶园 N₂O 排放通量均与土壤 NO₃⁻-N 含量呈显著正相关关系,而与 NH₄⁺-N 相关性不显著(表 2)。有研究发现茶园随着土壤 pH 的降低,硝化作用受到抑制,N₂O 主要通过反硝化过程产生^[19]。本研究中,茶园土壤 pH 值较低(pH<4.5),茶园土壤 N₂O 主要由反硝化作用产生,茶园土壤 NO₃⁻-N 对 N₂O 的产生影响较明显。另一方面,茶树有喜铵的特性,茶园土壤中的 NH₄⁺-N 易被茶树根系所吸收^[20],可能导致 NH₄⁺-N 含量与 N₂O 排放通量相关性不显著。林地土壤 N₂O 排放通量与 NH₄⁺-N 含量呈极显著相关关系(表 2)。这与王颖等^[21]针叶林 N₂O 通量与 NH₄⁺-N 含量呈显著正相关的研究结果一致,土壤 NH₄⁺-N 是影响林地 N₂O 排放关键因素。当水分含量较低时,受人为活动干扰较小和未施肥的林地土壤排放的 N₂O 主要由硝化作用产生,N₂O 排放通量随着水分的增加而增加,土壤含水量的提高促进了土壤反硝化过程,从而增加了 N₂O 排放量;但是,N₂O 排放通量并未随着土壤含水量的提高而持续增高,当含水量(WFPS)高于 76%时,N₂O 排放通量反而明显降低。这是由于反硝化作用更彻底促使 N₂O 进一步转化为 N₂^[22]。另外,温度也是影响 N₂O 排放的重要因子,Agehara 等^[23]的研究表明 N₂O 排放通量与温度呈正相关关系。本研究中,茶园

和林地土壤 N_2O 排放通量均随 5 cm 土壤温度升高而增高,逐步回归分析表明,5 cm 土壤温度是影响两种利用方式下土壤 N_2O 排放的重要环境因子。

有研究表明,在大区域尺度内降雨是土壤含氮气体排放的主要驱动因子之一,是导致森林土壤成为大气 N_2O 排放源的重要原因^[24]。本研究中茶园和林地土壤 N_2O 排放通量均与 5 d 累积降雨量呈显著的正相关关系($P<0.05$)。其他研究也有类似结果:Almaraz 等^[25]的研究表明,当土壤温度高于 5 °C 时,土壤 N_2O 排放通量与 7 d 累积降雨量呈显著正相关关系;Marchon 等^[26]的研究得出,降雨显著促进了土壤 N_2O 排放,并在降雨后观测到 N_2O 排放峰值;在热带地区河滨带生态系统研究中也得出土壤 N_2O 排放通量与 5 d 累积降雨量之间存在极显著的正相关关系^[27]。降雨促进土壤 N_2O 排放,主要是由于其增加了土壤含水量,而施肥后降雨将导致 N_2O 高排放^[28-29]。本研究也观测到类似现象,于 3 月 21 日和 5 月 9 日观测到茶园土壤 N_2O 排放峰值。

4 结论

(1) 中亚热带红壤丘陵区不同植茶年限茶园和林地土壤 N_2O 排放量存在显著差异,茶园土壤 N_2O 排放量显著高于林地,50 年茶园土壤 N_2O 排放量显著高于 20 年茶园,春季 50 年茶园、20 年茶园和林地土壤 N_2O 累积排放量分别为 2.07、1.39 kg $\text{N}_2\text{O}-\text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 0.22 kg $\text{N}_2\text{O}-\text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

(2) 观测期内,土壤 NO_3^--N 是红壤丘陵区茶园 N_2O 排放重要影响因子,而土壤水分、 NH_4^+-N 含量和 5 cm 土壤温度均对林地土壤 N_2O 排放有显著影响。

(3) 施肥和降雨后茶园都观测到 N_2O 排放峰,降雨对林地土壤 N_2O 排放有一定的激发效应,这些短期事件对该地区茶园和林地土壤 N_2O 排放的时间变化有显著影响。

参考文献:

- [1] Ravishankara A R, Portmann R W. Nitrous oxide (N_2O): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century[J]. *Science*, 2009, 326(5949): 123–125.
- [2] IPCC. Changes in atmospheric constituent and in radiative forcing[M]// Solomon S, Qin D, Manning M. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge, United Kingdom/ New York, USA: Cambridge University Press, 2007: 141–212.
- [3] IPCC. Mitigation of Climate Change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the IPCC[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [4] IPCC. Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [5] Li W, Zheng Z, Liu T, et al. Effect of tea plantation age on the distribution of soil organic carbon fractions within water-stable aggregates in the hilly region of Western Sichuan, China[J]. *Catena*, 2015, 133: 198–205.
- [6] Myles R A, Stott P A, Mitchell J F B, et al. Quantifying the uncertainty in forecasts of anthropogenic climate change[J]. *Nature*, 2000, 407(6804): 617–620.
- [7] 王晟强, 郑子成, 李廷轩. 植茶年限对土壤团聚体氮、磷、钾含量变化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1393–1402.
WANG Sheng-qiang, ZHENG Zi-cheng, LI Ting-xuan. Effects of ages of tea plantations on changes of nitrogen, phosphorus and potassium contents in soil aggregates[J]. *Journal of Plant Nutrition & Fertilizer*, 2013, 19(6): 1393–1402.
- [8] Hoben J P, Gehl R J, Millar N, et al. Nonlinear nitrous oxide (N_2O) response to nitrogen fertilizer in on-farm corn crops of the US Midwest[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(2): 1140–1152.
- [9] Ma B L, Wu T Y, Tremblay N, et al. Nitrous oxide fluxes from corn fields: on-farm assessment of the amount and timing of nitrogen fertilizer[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 156–170.
- [10] Zebbarth B J, Rochette P, Burton D L. N_2O emissions from spring barley production as influenced by fertilizer nitrogen rate[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2008, 88(2): 197–205.
- [11] Burton D L, Zebbarth B J, Gillam K M, et al. Effect of split application of fertilizer nitrogen on N_2O emissions from potatoes[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2008, 88(2): 229–239.
- [12] Gu J, Nicoulaud B, Rochette P, et al. A regional experiment suggests that soil texture is a major control of N_2O emission from tile-drained winter wheat fields during the fertilization period[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 60: 134–141.
- [13] Morley N, Baggs E M. Carbon and oxygen controls on N_2O and N_2 production during nitrate reduction[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42(10): 1864–1871.
- [14] 李 玮, 郑子成, 李廷轩, 等. 退耕植茶对川西低山丘陵区土壤有机碳库的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(8): 1642–1651.
LI Wei, ZHENG Zi-cheng, LI Ting-xuan, et al. Effects of returning farmland to tea on soil organic carbon pool of hilly region in the western Sichuan[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(8): 1642–1651.
- [15] 李睿达, 张 凯, 苏丹, 等. 施氮强度对不同土壤有机碳水平桉树林温室气体通量的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(10): 3903–3910.
LI Rui-da, ZHANG Kai, SU Dan, et al. Effects of nitrogen application on soil greenhouse gas fluxes in eucalyptus plantations with different soil organic carbon content[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(10): 3903–3910.
- [16] Jäger N, Duffner A. Effect of fertilization history on short-term emission of CO_2 and N_2O after the application of different N fertilizers: A laboratory study[J]. *Archives of Agronomy & Soil Science*, 2013, 59(2): 161–171.
- [17] Cannavo P, Richaume A, Lafolie F. Fate of nitrogen and carbon in the

- vadose zone: In situ and laboratory measurements of seasonal variations in aerobic respiratory and denitrifying activities[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36(3):463–478.
- [18] 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.
- ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, et al. Key microbial processes in nitrous oxide emissions of agricultural soil and mitigation strategies[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2):792–800.
- [19] Tokuda S I, Hayatsu M. Nitrous oxide emission potential of 21 acidic tea field soils in Japan[J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2001, 47(3):637–642.
- [20] Yang Y Y, Li X H, Ratcliffe R G, et al. Characterization of ammonium and nitrate uptake and assimilation in roots of tea plants[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2013, 60(1):91–99.
- [21] 王 颖, 王传宽, 傅民杰, 等. 四种温带森林土壤氧化亚氮通量及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2009, 20(5):1007–1012.
- WANG Ying, WANG Chuan-kuai, FU Min-jie, et al. Soil nitrous oxide emission in four temperate forests in Northeastern China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(5):1007–1012.
- [22] 伍 星, 刘慧峰, 张令能, 等. 雪被和土壤水分对典型半干旱草原土壤冻融过程中 CO₂ 和 N₂O 排放的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(19):5484–5493.
- WU Xing, LIU Hui-feng, ZHANG Ling-neng, et al. Effects of snow cover and soil moisture on CO₂ and N₂O fluxes from typical semiarid grassland soil subjected to freeze-thaw cycles[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(19):5484–5493.
- [23] Agehara S, Warncke D D. Soil moisture and temperature effects on nitrogen release from organic nitrogen sources[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(6):1844–1855.
- [24] Dick J, Skiba U, Wilson J. The effect of rainfall on NO and N₂O emissions from Ugandan agroforest soils[J]. *Phyton*, 2001, 41(3):73–80.
- [25] Almaraz J J, Zhou X, Mabood F. Greenhouse gas fluxes associated with soybean production under two tillage systems in Southwestern Quebec [J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 104(1):134–139.
- [26] Machon A, Horváth L, Weidinger T, et al. Estimation of net nitrogen flux between the atmosphere and a semi-natural grassland ecosystem in Hungary[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 61(5):631–639.
- [27] Kachenchart B, Jones D L, Gajaseeni N, et al. Seasonal nitrous oxide emissions from different land uses and their controlling factors in a tropical riparian ecosystem[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 158(3):15–30.
- [28] Riya S, Zhou S, Kobara Y, et al. Effects of N loading rate on CH₄ and N₂O emissions during cultivation and fallow periods from forage rice fields fertilized with liquid cattle waste[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 161:124–130.
- [29] Jiang J, Hu Z, Sun W, et al. Nitrous oxide emissions from Chinese cropland fertilized with a range of slow-release nitrogen compounds[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2010, 135(3):216–225.