

田亚男, 何志龙, 吕昭琪, 等. 凋落茶叶对华中地区酸化茶园土壤 N_2O 与 CO_2 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8): 1625–1632.

TIAN Ya-nan, HE Zhi-long, LÜ Zhao-qi, et al. Effects of tea litter applications on N_2O and CO_2 fluxes from acidification of tea garden soil in Central China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8): 1625–1632.

凋落茶叶对华中地区酸化茶园土壤 N_2O 与 CO_2 排放的影响

田亚男¹, 何志龙¹, 吕昭琪¹, 夏文建², 林 杉^{1*}

(1. 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; 2. 江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所, 南昌 330200)

摘 要: 采用室内培养试验方法, 研究了凋落茶叶添加(0、5、10 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 20 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)对酸化茶园土壤 N_2O 和 CO_2 排放特征的影响。结果表明: 4 种添加水平下, N_2O 和 CO_2 排放通量分别为 0.24~3.92 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 0.33~1.84 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$; 凋落茶叶的添加显著促进了酸化茶园土壤 N_2O 和 CO_2 排放($P<0.05$), 且两种气体的排放通量随着凋落茶叶添加量的增加而增加; 凋落茶叶显著提高了酸化土壤 pH 值($P<0.05$), 且添加量越多, pH 值变幅越大, 其一定程度上改善了茶园土壤酸化现象。茶园土壤铵态氮与 N_2O 排放通量呈极显著相关, 而硝态氮与 N_2O 排放通量未呈显著相关性。土壤可溶性有机碳含量与 N_2O 和 CO_2 排放通量均呈极显著相关关系。茶园土壤 N_2O 排放通量和 CO_2 排放通量呈极显著正相关。研究结果有助于阐明凋落茶叶对茶园土壤温室气体排放的作用规律, 且对了解茶园生态系统碳氮循环有一定的理论意义。

关键词: 凋落茶叶; 酸化茶园; N_2O 排放; CO_2 排放; pH 值

中图分类号: X511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2016)08-1625-08 doi:10.11654/jaes.2016-0052

Effects of tea litter applications on N_2O and CO_2 fluxes from acidification of tea garden soil in Central China

TIAN Ya-nan¹, HE Zhi-long¹, LÜ Zhao-qi¹, XIA Wen-jian², LIN Shan^{1*}

(1. 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; 2. Institute of Soil Fertilizer and Resource Environment, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China)

Abstract: Tea litter may impact soil microbes and soil properties, thus greenhouse gas emissions from soil. In this paper, a laboratory study was conducted to investigate N_2O and CO_2 fluxes from acidification of tea garden soil receiving different amounts of tea litter: 0, 5, 10 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and 20 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ soil. Results showed that N_2O and CO_2 fluxes from four treatments ranged from 0.24 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ to 3.92 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ and 0.33 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ to 1.84 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, respectively. Tea litter applications significantly increased N_2O and CO_2 fluxes ($P<0.05$) in a dose-effect manner. Soil pH values from three tea litter treatments were significantly higher ($P<0.05$) than that from the control treatment, and the pH values increased with increasing amounts of tea litters added. The N_2O emissions from tea garden soil had significantly positive correlation with soil NH_4^+-N content, but did not show relationship with soil NO_3^--N . Soil DOC content was significantly positive correlated with N_2O and CO_2 fluxes. There was highly significant and positive correlation between N_2O and CO_2 fluxes in tea garden soil. These results would advance our understanding of greenhouse gas fluxes and carbon and nitrogen cycling in tea garden soil system.

Keywords: tea litter; acidification of tea garden; N_2O flux; CO_2 flux; pH value

收稿日期: 2016-01-13

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: 田亚男(1991—), 女, 山东聊城人, 硕士研究生, 从事农田温室气体研究。E-mail: tynfighting@163.com

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

近年来,由于温室气体浓度不断上升导致的气候变暖,已成为当今全球性的环境问题。 CO_2 是大气中最主要的温室气体^[1],对全球变暖的贡献率在60%以上^[2]。 N_2O 是仅次于 CO_2 的一种温室气体,其增温潜势是等质量 CO_2 的310倍^[3]。目前大气中 CO_2 和 N_2O 浓度持续上升,分别达到了 $393.1\ \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $325.1\ \text{nL}\cdot\text{L}^{-1}$,比工业革命前(1750年)增加了40%和20%^[4]。农业生态系统是温室气体排放的主要来源,其占温室气体排放总量的20%~35%。据农业部门估计,在全球范围内,农业活动产生的 N_2O 排放占总人类活动产生 N_2O 排放的70%^[5],因此,研究不同农业生态系统温室气体排放已成为当今热点问题。

茶园是我国主要的农业生态系统之一,我国茶园面积和茶叶产量均居世界首位^[6]。在茶园生态系统中,茶园定期修剪以及茶树自然落叶过程,使茶园每年都有一定量的凋落茶叶归还于土壤,一方面这些凋落茶叶在养分循环中起到连接植物与土壤的“纽带”作用^[7];另一方面,凋落物作为养分的基本载体,不仅影响土壤微生物活性,还会影响土壤酸度,进而改变温室气体的产生和排放^[8-10,24]。目前,关于凋落物的研究主要集中在森林凋落物及农作物残落物^[10-14],而对于茶园凋落物对酸化茶园土壤的改良效果及温室气体排放的影响报道较少。本研究以华中地区酸化茶园土壤为对象,通过室内培养试验,探讨了凋落茶叶不同添加量对茶园土壤酸度及温室气体排放的影响,以期明确茶园土壤温室气体排放对凋落物输入的响应特征。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采集于湖北省咸宁市贺胜桥镇茶园($29^{\circ}58'28''\text{N}$, $114^{\circ}21'42''\text{E}$)表层(0~20 cm)土壤,随机分成两个部分:一部分风干后过2 mm筛,用于培养试验;另一部分用四分法取一定土壤研磨过0.25 mm筛,用于土壤理化性质测定。凋落物捡取自该茶园秋季凋落叶,置于 $65\ ^{\circ}\text{C}$ 的烘箱内干燥72 h直至恒重并粉碎通过0.25 mm筛待用。供试土壤初始pH值为4.64,全碳含量为 $17.16\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮含量为 $1.04\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,C/N为16.50;凋落茶叶全碳含量为 $60.15\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮含量为 $3.78\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,C/N为15.91。

1.2 试验设计

称取过2 mm孔筛的风干土样500 g于1 L广口瓶中,先加适量蒸馏水湿润土壤,预培养6 d,以激活

土壤微生物和消除干湿效应^[15]。试验设置4种添加凋落物水平的处理:CK($0\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、T5($5\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、T10($10\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、T20($20\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。用蒸馏水调节土壤孔隙含水量(Water filled pore space, WFPS)为80%,在 $25\ ^{\circ}\text{C}$ 条件下恒温培养26 d。利用称重法,每2 d补水一次,以补充因蒸发引起的水分损失。每个处理设置6个重复,3个用于 N_2O 和 CO_2 浓度测定,3个用于土壤pH值、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、DOC含量动态变化分析。

在培养的第1、2、3、4、5、6、8、12、14、18、22、26 d采集气体样品和土壤样品,测定土壤 N_2O 和 CO_2 产生速率及土壤理化指标。采气前,反复抽气并通入大气使瓶内气体浓度与瓶外大气浓度平衡,采集培养瓶上部空间气体样本,作为初始气体浓度,记录采样时间,密闭静置培养1 h后,用注射器反复推拉针管3次以混匀瓶内气体,然后立即将采集气体样品存入事先抽成真空的集气瓶中,并再次记录采样时间。

1.3 气体及土壤样品分析

N_2O 和 CO_2 浓度由气相色谱仪(Agilent 7890A)测定;土壤pH按水土比2.5:1搅拌,pH计测定;土壤无机氮(NH_4^+-N 和 NO_3^--N)含量采用 $1\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl浸提,德国Seal Analytical AA3流动分析仪测定;土壤中DOC含量采用德国Elementer Vario TOC仪测定。

1.4 数据处理

采用Excel对 N_2O 、 CO_2 排放量及土壤各指标含量进行计算,采用SPSS16.0进行Pearson相关分析和方差分析,采用Origin8.0对动态变化进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤 N_2O 和 CO_2 排放通量变化

培养期内,各处理 N_2O 和 CO_2 排放通量均表现出先增加后下降,最后趋于平稳的状态(图1)。与CK处理相比,添加凋落茶叶后 N_2O 排放通量激增,T5、T10、T20处理 N_2O 排放高峰均出现在第1 d,峰值分别为 2.14 、 8.96 、 $19.67\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$,第6 d后基本趋于稳定且各处理间 N_2O 排放通量差异缩小;而 CO_2 排放的变化更为明显,与CK处理相比,各处理 CO_2 排放通量在添加凋落茶叶后也显著增加,T5处理 CO_2 排放高峰出现在第2 d,T10、T20处理则出现在第3 d,峰值分别为 1.35 、 2.18 、 $3.83\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$,第10 d后基本趋于稳定,但凋落茶叶高添加量的土壤 CO_2 排放始终高于低添加量的土壤。培养结束时,T20、T10、T5处理土壤 CO_2 排放通量分别是CK处理的4.19、2.99、1.87倍。

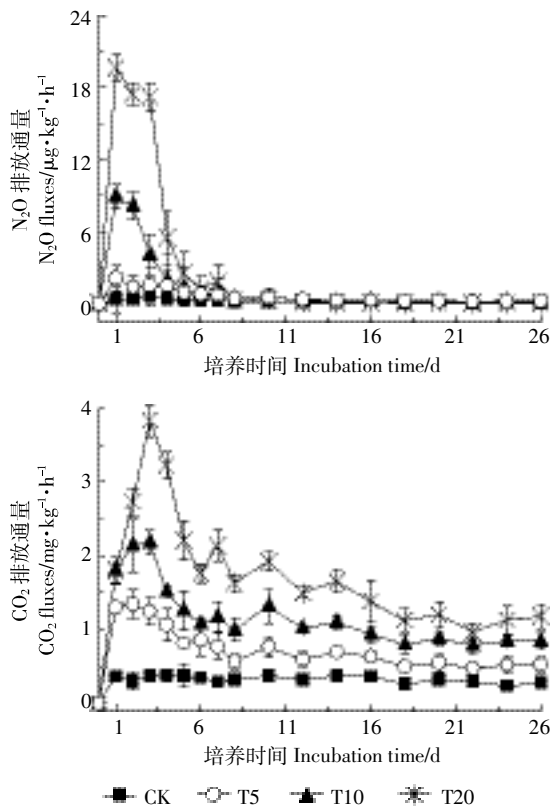
图1 土壤 N₂O 和 CO₂ 排放通量随时间动态变化

Figure 1 Temporal dynamics of nitrous oxide and carbon dioxide fluxes in tea soil

2.2 凋落茶叶对 N₂O 和 CO₂ 排放的影响

培养期内,各处理 N₂O 与 CO₂ 累积排放量大小顺序均为 T20>T10>T5>CK。T5、T10、T20 处理 N₂O 累积排放量较 CK 处理分别增加了 74.11、367.31、1 809.56 μg·kg⁻¹(表 1),且 T10、T20 处理与 CK 处理达到显著差异($P<0.05$)。各处理的 CO₂ 累积排放量也显著高于 CK 处理($P<0.05$),T5、T10、T20 处理较 CK 处理分别显著增加了 241.44、500.24、845.78 mg·kg⁻¹。N₂O 与 CO₂ 平均排放通量与凋落茶叶添加量呈显著和极显著的线性正相关关系(图 2)。可见,添加凋落茶叶后均显著促进了 N₂O 和 CO₂ 排放,且 N₂O 和 CO₂ 累积排放量随着添加量的增加而增多。

2.3 土壤无机氮、DOC、pH 动态变化

整个培养阶段,各处理铵态氮含量呈现先增加后降低直至平稳的过程(图 3)。各处理铵态氮含量均在第 2 d 达到峰值,T20 处理的铵态氮含量最高,其次是 T10 处理,T5 处理与 CK 处理相近,之后急剧下降,第 6 d 后,各处理铵态氮含量已趋于稳定且基本相同。而不同处理间的土壤硝态氮含量动态变化趋势不一致,在培养期间,CK 处理的土壤硝态氮含量逐渐增加而

表 1 不同凋落茶叶添加量处理下茶园土壤 N₂O 和 CO₂ 排放
Table 1 N₂O and CO₂ emissions under different levels of tea litter addition

处理 Treatment	N ₂ O/μg·kg ⁻¹		CO ₂ /mg·kg ⁻¹	
	N ₂ O 累积排放量 N ₂ O cumulative emission	增加量 Increment	CO ₂ 累积排放量 CO ₂ cumulative emission	增加量 Increment
CK	165.63±21.46c	—	203.50±6.75d	—
T5	239.74±18.13c	74.11	444.94±29.96c	241.44
T10	532.94±27.74b	367.31	703.74±34.12b	500.24
T20	1 975.09±23.96a	1 809.46	1 049.28±34.34a	845.78

注:同列不同英文小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters within a column mean significant difference ($P<0.05$).

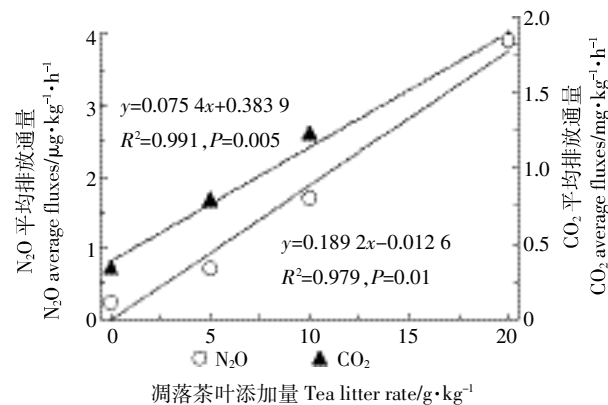
图2 凋落茶叶添加量与 N₂O 和 CO₂ 排放通量的关系

Figure 2 Correlations between tea litter rate and nitrous oxide and carbon dioxide fluxes

后趋于稳定,而添加凋落茶叶后,土壤硝态氮含量前期先逐渐增加,T5 和 T10 处理硝态氮含量在第 5 d 后下降并趋于稳定,而 T20 处理硝态氮含量在第 5 d 剧烈下降,第 11 d 后逐渐趋于稳定。培养结束时,CK 处理硝态氮含量最高,T20 处理最低。

添加凋落茶叶处理土壤 DOC 含量均表现为先增加后剧烈下降的趋势,第 1 d 均达到峰值,T20 处理峰值最高,为 375.32 mg·kg⁻¹,其次是 T10 和 T5 处理,含量分别为 202.31 mg·kg⁻¹ 和 117.63 mg·kg⁻¹,第 3 d 后含量已基本趋于稳定,而对照处理土壤 DOC 含量基本保持不变。培养结束时,各处理 DOC 含量平均值存在显著差异($P<0.05$),高低顺序为 T20>T10>T5>CK,表明凋落茶叶增加土壤 DOC 含量。

培养期间各处理土壤 pH 值变化趋势基本一致,凋落茶叶的添加明显提高了土壤 pH 值,且添加量越多,pH 值变幅越大(图 5)。培养结束后,土壤 pH 值呈现显著差异,T20 处理的土壤 pH 值最高,其次是 T10 处理,CK 处理最低。添加凋落物后 T20、T10、T5 处理

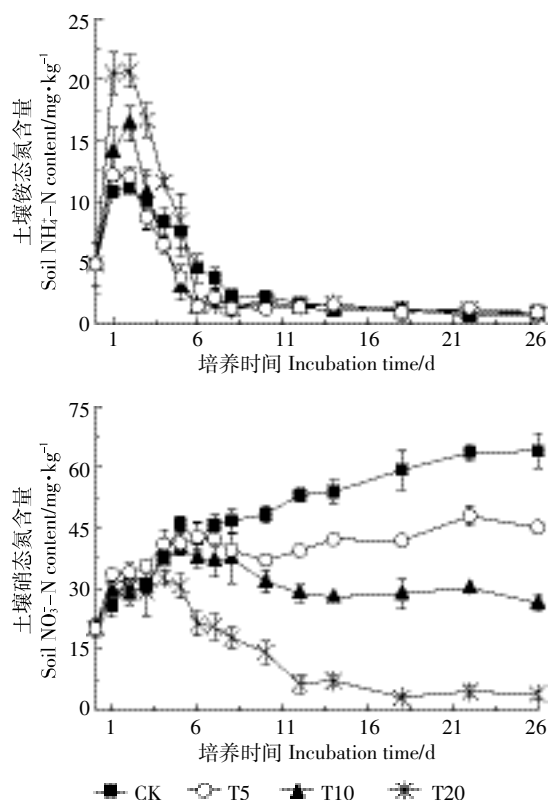
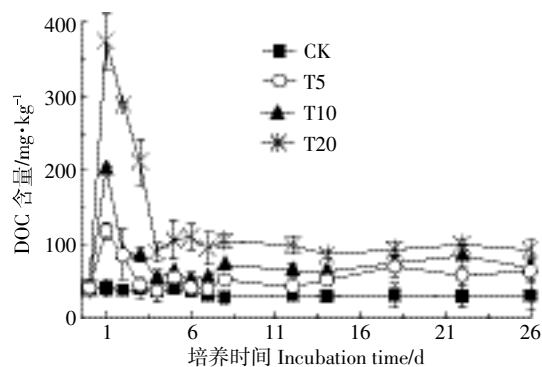
图3 土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量动态变化Figure 3 Temporal dynamics of soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content

图4 土壤 DOC 含量动态变化

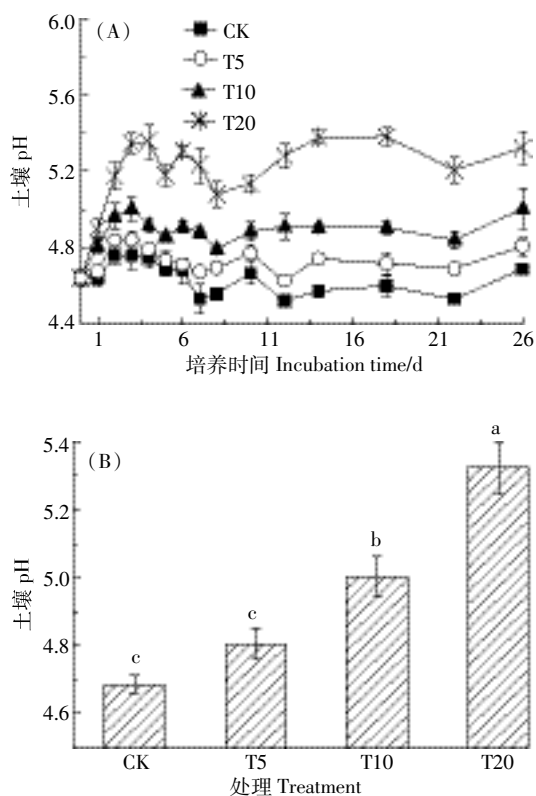
Figure 4 Temporal dynamics of soil DOC content

土壤 pH 值较 CK 处理分别提高了 0.64、0.32、0.12。

2.4 土壤 N_2O 和 CO_2 排放影响因素

2.4.1 土壤矿质氮与 N_2O 排放的关系

土壤矿质氮是影响 N_2O 排放通量的主要因素之一。通过对不同处理下土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量与 N_2O 排放通量的相关性分析表明,二者呈极显著正相关关系 ($P<0.01$),说明土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量越高, N_2O 排放越多。而不同处理下土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与 N_2O 并不存在显著相关关系(图 6)。



A: pH 值随时间变化; B: 培养结束后土壤 pH 值

A: Temporal dynamics of soil pH value;

B: Soil pH value at the end of the experiments

图5 土壤 pH 动态变化

Figure 5 Temporal dynamics of soil pH values

2.4.2 土壤 DOC 与 N_2O 和 CO_2 排放的关系

土壤可溶性有机碳是土壤活性有机碳库的重要表征指标之一,其与土壤温室气体的产生直接相关。不同处理下 DOC 对 N_2O 和 CO_2 排放通量均有极显著影响,与 N_2O 和 CO_2 排放呈线性正相关关系 ($P<0.01$),其相关系数 R^2 分别为 0.799 和 0.337(图 7)。

2.4.3 土壤 pH 值与 N_2O 排放的关系

土壤 pH 值与 N_2O 平均排放通量的关系如图 8 所示,土壤 pH 值极显著影响了 N_2O 的排放 ($P<0.01$),其与 N_2O 平均排放通量呈线性正相关关系,且相关系数达到 0.998。表明在一定范围内,酸化茶园土壤 pH 值越接近中性,茶园土壤 N_2O 排放通量越高。

2.5 N_2O 排放通量和 CO_2 排放通量的相关关系

华中地区酸化茶园土壤 N_2O 排放通量与 CO_2 排放通量存在一定的相关关系(图 9)。本研究,添加凋落茶叶后 N_2O 排放通量与 CO_2 排放通量呈极显著正相关关系 ($P<0.01$),其相关系数 $R^2=0.469$ 。可见, N_2O 与 CO_2 的生成环境具有紧密的关联性。

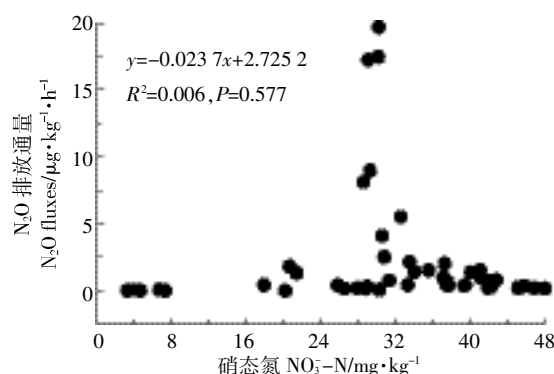
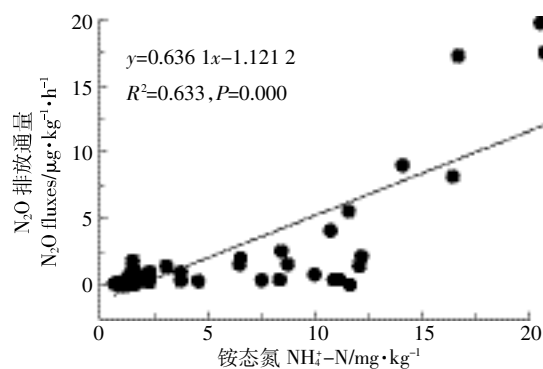
图 6 土壤矿质氮与 N₂O 排放通量的关系

Figure 6 Correlations between soil mineral nitrogen content and N₂O emission fluxes

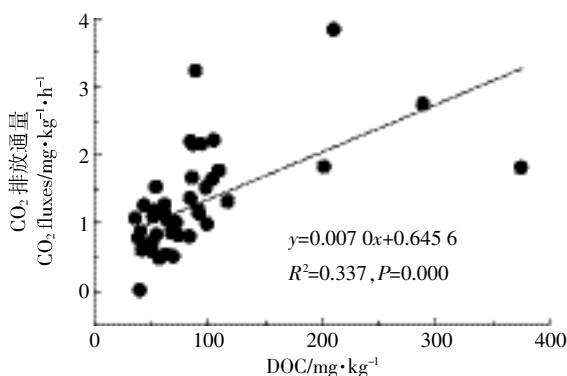
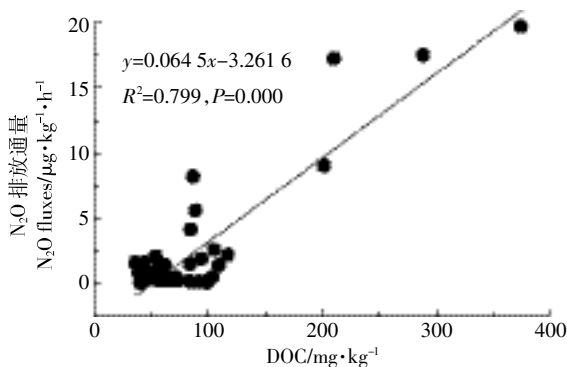
图 7 土壤可溶性有机碳与 N₂O 和 CO₂ 排放的关系

Figure 7 Correlations between DOC and N₂O and CO₂ emission

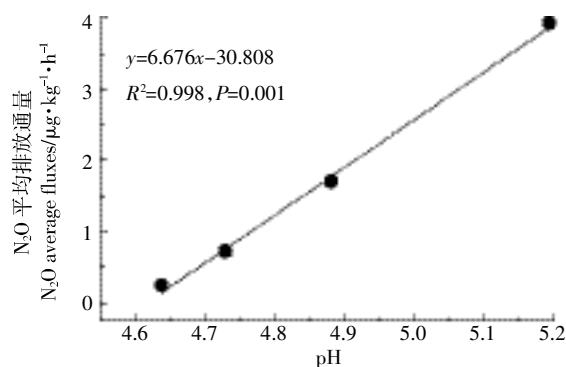
图 8 土壤 pH 值与 N₂O 排放的关系

Figure 8 Correlations between soil pH value and N₂O emission

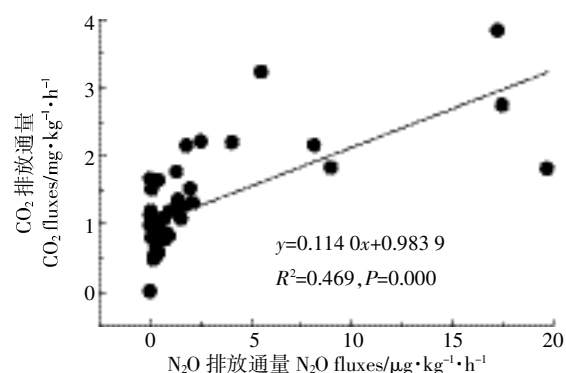
图 9 N₂O 排放通量与 CO₂ 排放通量的关系

Figure 9 Correlations between N₂O and CO₂ emission fluxes

3 讨论

本研究中, 添加凋落茶叶促进了温室气体排放, 一方面, 凋落茶叶作为茶园土壤丰富的碳源, 为微生物提供了丰富的物质和能源, 使微生物数量增加, 活动加剧, 呼吸作用迅速增强; 另一方面, 凋落茶叶的添加激发了土壤有机质及凋落物的矿化分解^[16], 导致 CO₂ 大量产生。因此, 本研究中发现土壤 CO₂ 排放通量与凋落茶叶添加量呈极显著的线性正相关关系(图 2, $P < 0.01$), CO₂ 排放通量随着凋落茶叶添加量的增加而逐渐增多。微生物分解凋落茶叶中的碳源会消耗土壤中的氧气, 加快土壤厌氧环境的形成, 同时又为硝化和反硝化作用提供更多的底物, 导致 N₂O 排放增加。本研究得出, N₂O 排放通量与凋落茶叶添加量呈现显著的线性正相关关系(图 2, $P < 0.01$)。王光军等^[10]研究马尾松林土壤呼吸对去除和添加凋落物处理的响应结果表明: 树木凋落物促进森林土壤呼吸, 施加凋落物处理可使土壤呼吸速率增加了 17.03%, 与本实验结果一致。Jäger 等^[17]室内培养试验的结果表明: 土壤有机碳含量越高, N₂O 排放越多。倪玉雪等^[18]研究也发

现外源碳的增加促进了 N_2O 和 CO_2 的排放。此外,本研究还发现 N_2O 排放通量与 CO_2 排放通量呈极显著正相关关系(图 9, $P<0.01$),两者排放通量都随着凋落茶叶的添加而增加,且累积排放量随着添加量的增加而增多。这与 Millar 等^[19]研究向土壤中添加树林中的残留物发现 N_2O 排放通量与 CO_2 排放通量显著相关结果一致。

土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 作为微生物进行硝化和反硝化作用的底物,直接影响了硝化反硝化的强度。通过对培养试验过程中土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量的监测(图 3),土壤 NH_4^+-N 含量在第 3 d 后剧烈下降,表明土壤中进行硝化作用比较强烈,在这个过程中产生了大量 N_2O ,因此本研究中发现 NH_4^+-N 含量与 N_2O 排放通量呈极显著正相关(图 6, $P<0.01$)。Chen 等^[20]研究旱地硝化和反硝化作用时,发现 N_2O 的产生与硝化作用极显著相关;姜宁宁等^[21]研究不同氮源添加对菜地土壤 N_2O 排放影响结果也表明,铵态氮肥促进了 N_2O 排放。 NO_3^--N 含量在培养初始时由于 NH_4^+-N 的转化而增加,而第 5 d 后凋落茶叶处理的土壤中 NO_3^--N 含量下降,CK 处理则继续增加,表明添加凋落茶叶后 NO_3^--N 很可能通过反硝化作用被转化成 N_2O ,这也说明凋落茶叶处理的土壤中产生的 N_2O 既来自硝化作用,也来自反硝化作用。但添加凋落茶叶的 T5 和 T10 处理, NO_3^--N 含量下降趋势不明显,说明只进行了微弱的反硝化作用, N_2O 排放来源主要是硝化作用。因此本研究中 NO_3^--N 含量与 N_2O 排放通量并没有显著相关关系(图 6)。

土壤可溶性有机碳(DOC)是土壤有机碳中最活跃的组分,是土壤中易于利用的养分库及有机物分解和氮矿化的动力。整个培养期内,DOC 含量先增加后下降直至趋于稳定,这主要是因为凋落茶叶含有大量的有机物质,添加到土壤后,微生物将凋落物及土壤中的大分子有机物分解成可直接利用的碳源,使 DOC 含量急剧升高,呼吸作用增强;随着培养时间的延长,由于可利用的碳源被分解,DOC 含量减少,呼吸作用减弱,当微生物数量、可利用的碳氮源处于平衡时,DOC 含量和 CO_2 排放通量基本保持稳定(图 4)。因此,DOC 含量变化趋势与 CO_2 排放趋势一致,呈现极显著正相关关系(图 7, $P<0.01$)。李彬彬等^[22]研究结果也表明 DOC 含量与 CO_2 排放呈显著相关。而 DOC 含量还与 N_2O 排放通量呈极显著正相关(图 7, $P<0.01$),这可能由于 DOC 不仅为硝化和反硝化细菌提供碳源和能源,还为反硝化作用提供了电子受体^[23]。

本研究中,凋落茶叶处理的 DOC 含量均大于对照处理,且添加量越多,DOC 含量增加越多,这是由于添加凋落物后,刺激了微生物的繁殖,促进了对凋落物的分解,且添加量越多分解越多,DOC 作为有机物质的分解产物含量逐渐升高。

随着茶树种植年限及施肥的影响,茶园土壤酸化问题日益加剧。本研究中,添加凋落茶叶后,土壤 pH 值升高,且添加量越多,pH 值增幅越大(图 5)。一方面可能是凋落茶叶中的碱性成分(灰化碱)中和了土壤酸度,提高土壤 pH 值^[24];另一方面可能是凋落物中有机氮的矿化过程会消耗质子,从而提高土壤 pH 值^[25]。但有机氮矿化过程中产生铵态氮,促进硝化作用释放一定量的质子,使 pH 值有一定的降低^[25],这也可能造成在培养过程中 pH 值的波动(图 5)。王辉等^[24]研究结果也表明茶树叶提高了土壤 pH 值,与本文结果一致;而杨平等^[26]研究发现茶树修剪叶的添加降低了土壤 pH 值,认为如果茶园初始 pH 值较低,会改变土壤中化学反应的发生条件,此时,灰化碱起到中和的作用较小,而有机阴离子的去羧基化也会被氧化反应取代,且由于该实验是淋溶条件下的模拟土柱试验,盐基离子更容易淋失,使土壤酸度进一步增加。因此,茶树落叶对茶园土壤酸化的影响,需根据土壤特定的理化条件而定。

土壤 pH 值对 N_2O 排放也有一定的影响,其可以通过影响硝化和反硝化作用微生物的活性影响 N_2O 排放。一般认为,pH 值为 6~8 的中性条件最适宜土壤中反硝化作用,在酸性条件下反硝化作用会受到限制^[27]。当土壤 pH 值为中性时, N_2 是反硝化作用的主要产物,随着 pH 值的降低, N_2O 所占比例增大,当 pH 值降至 5.2 时, N_2O 成为主要产物^[28]。本研究中,土壤 pH 值主要在 4.5~5.4 之间,此时反硝化作用比较微弱,这也进一步证明 N_2O 主要来源于硝化作用。本研究还发现,土壤 pH 值与 N_2O 平均排放通量呈极显著正相关关系(图 8, $P<0.01$),表明在此 pH 值范围内, N_2O 排放随着 pH 值增加而增加。有研究表明,pH 值在 3.4~6.8 内,硝化作用与土壤 pH 值呈正相关^[29];Han 等^[30]研究也认为,茶园土壤硝化作用与土壤 pH 值呈正相关性或显著正相关性,与本文结果一致。

4 结论

凋落茶叶显著促进了华中地区酸化茶园土壤 N_2O 和 CO_2 排放;相关分析表明可溶性有机碳含量与 N_2O 和 CO_2 排放通量的相关性极显著,土壤铵态氮与

N₂O 排放通量极显著相关,而硝态氮与 N₂O 排放通量未呈相关性。凋落茶叶显著提高了茶园土壤 pH 值,在一定程度上能缓和茶园土壤酸化。

凋落茶叶的添加能有效促进有机物质的分解,改变茶园的碳氮供应及动态变化,调节茶园酸化程度,对了解茶园生态系统碳氮循环有一定的理论意义及实际参考价值,今后应进一步深入研究茶园生态系统碳氮循环机制,以期优化茶园农业管理措施提供理论指导。

参考文献:

- [1] Assal R S, Black T A, Trofymow J, et al. Soil CO₂ and N₂O flux dynamics in a nitrogen-fertilized Pacific Northwest Douglas-firststand[J]. *Geoderma*, 2010, 157(3): 118–125.
- [2] 石福臣. 应对气候变暖发展低碳经济的生产与生活策略[J]. 低碳经济, 2013, 2: 1–5.
SHI Fu-chen. Countermeasures for controlling greenhouse gas emission and preventing global warming[J]. *Journal of Low Carbon Economy*, 2013, 2: 1–5.
- [3] Hopkins A, Del Prado A. Implications of climate change for grassland in Europe: Impacts, adaptations and mitigation options: A review[J]. *Grass and Forage Science*, 2007, 62(2): 118–126.
- [4] IPCC. Mitigation of Climate Change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the IPCC[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [5] Farquharson R, Baldock J. Concepts in modelling N₂O emissions from land use[J]. *Plant and Soil*, 2008, 309(1/2): 147–167.
- [6] 马建堂. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012: 509–512.
MA Jian-tang. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2012: 509–512.
- [7] Liu S G, Bond-Lamberty B, Hicke J A, et al. Simulating the impacts of disturbances on forest carbon cycling in North America: Processes, data, models, and challenges[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2011, 116(G4). doi:10.1029/2010JG001585.
- [8] Kim Y S, Imori M, Watanabe M, et al. Simulated nitrogen inputs influence methane and nitrous oxide fluxes from a young larch plantation in Northern Japan[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 46: 36–44.
- [9] Livesley S J, Kiese R, Miehle P, et al. Soil-atmosphere exchange of greenhouse gases in a *Eucalyptus marginata* woodland, a clover-grass pasture, and *Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus* plantations[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(2): 425–440.
- [10] 王光军, 田大伦, 闫文德, 等. 马尾松林土壤呼吸对去除和添加凋落物处理的响应[J]. 林业科学, 2009, 45(1): 27–30.
WANG Guang-jun, TIAN Da-lun, YAN Wen-de, et al. Response of soil respiration to litterfall exclusion and addition in *Pinus massoniana* plantation in Hunan, China[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(1): 27–30.
- [11] Prévost-Bouré N C, Soudani K, Damesin C, et al. Increase in above-ground fresh litter quantity over-stimulates soil respiration in a temperate deciduous forest[J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, 46(1): 26–34.
- [12] Tian D L, Peng Y Y, Yan W D, et al. Effects of thinning and litter fall removal on fine root production and soil organic carbon content in Masson pine plantations[J]. *Pedosphere*, 2010, 20(4): 486–493.
- [13] Huang Y, Zou J W, Zheng X H, 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.
- [14] Begum N, Guppy C, Herridge D, et al. Influence of source and quality of plant residues on emissions of N₂O and CO₂ from a fertile, acidic Black Vertisol[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(3): 499–506.
- [15] Dick J, Skiba U, Wilson J. The effect of rainfall on NO and N₂O emissions from Ugandan agroforest soils[J]. *Phyton Horn*, 2001, 41(3): 73–80.
- [16] 王意锬, 方升佐, 田野, 等. 残落物添加对农林复合系统土壤有机碳矿化和土壤微生物量的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(22): 7239–7246.
WANG Yi-kun, FANG Sheng-zuo, TIAN Ye, et al. Influence of residue composition and addition frequencies on carbon mineralization and microbial biomass in the soils of agroforestry systems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(22): 7239–7246.
- [17] Jäger N, Duffner A, Ludwig B, et al. Effect of fertilization history on short-term emission of CO₂ and N₂O after the application of different N fertilizers: A laboratory study[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2013, 59(2): 161–171.
- [18] 倪玉雪, 孙卓玲, 尹兴, 等. 外加可溶性碳源对华北典型农田土壤 N₂O、CO₂ 排放的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 222–227.
NI Yu-xue, SUN Zhuo-ling, YIN Xing, et al. Influence of soluble carbon on N₂O and CO₂ emission from soil of typical farm-land in North China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(4): 222–227.
- [19] Millar N, Baggs E M. Chemical composition, or quality, of agroforestry residues influences N₂O emissions after their addition to soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(6): 935–943.
- [20] Chen S T, Huang Y. Determination of respiration, gross nitrification and denitrification in soil profile using BaPS system[J]. *Journal of Environment Science*, 2006, 18(5): 937–943.
- [21] 姜宁宁, 李玉娥, 华璐, 等. 不同氮源及秸秆添加对菜地土壤 N₂O 排放影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 219–223.
JIANG Ning-ning, LI Yu-e, HUA Luo, et al. Effect of different nitrogen sources and straw adding on N₂O emission from vegetable soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(1): 219–223.
- [22] 李彬彬, 马军花, 武兰芳. 土壤溶解性有机物对 CO₂ 和 N₂O 排放的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(16): 4690–4697.
LI Bin-bin, MA Jun-hua, WU Lan-fang. Effects of dissolved organic matter in soil on the emission of CO₂ and N₂O[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(16): 4690–4697.
- [23] 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.
- [24] 王 辉, 王 宁, 徐仁扣, 等. 茶叶叶和刺槐叶对茶园土壤酸度的改良效果[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(8): 1597–1601.
- WANG Hui, WANG Ning, XU Ren-kou, et al. Amelioration effect of tea tree leaves and acacia leaves on the acidity of tea garden soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(8): 1597–1601.
- [25] Xu R K, Coventry D R. Soil pH changes associated with lupin and wheat plant materials incorporated in a red-brown earth soil[J]. *Plant and Soil*, 2003, 250(1): 113–119.
- [26] 杨平平, 徐仁扣, 黎星辉. 淋溶条件下茶树修剪叶对土壤的酸化作用[J]. 安徽农学通报, 2013, 19(11): 7–10, 21.
- YANG Ping-ping, XU Ren-kou, LI Xing-hui. Soil acidification induced by pruned tea leaves under water leaching conditions[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2013, 19(11): 7–10, 21.
- [27] Paul E A. Soil microbiology, ecology and biochemistry[M]. Academic Press, 2014.
- [28] 谢立勇, 叶丹丹, 张 贺, 等. 旱地土壤温室气体排放影响因子及减排增汇措施分析[J]. 中国农业气象, 2011, 32(4): 481–487.
- XIE Li-yong, YE Dan-dan, ZHANG He, et al. Review of influence factors on greenhouse gases emission from upland soil and relevant adjustment practices[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(4): 481–487.
- [29] 翟 胜, 高宝玉, 王巨媛, 等. 农田土壤温室气体产生机制及影响因素研究进展[J]. 生态环境, 2008, 17(6): 2488–2493.
- ZHAI Sheng, GAO Bao-yu, WANG Ju-yuan, et al. Mechanism and impact factors of greenhouse gases generation from farmland[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(6): 2488–2493.
- [30] Han W Y, Kemmitt S J, Brookes P C. Soil microbial biomass and activity in Chinese tea gardens of varying stand age and productivity[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(7): 1468–1478.