

茶园及相邻林地土壤 N_2O 排放的垂直分布特征*

范利超 韩文炎** 李 鑫 李治鑫

(中国农业科学院茶叶研究所, 杭州 310008)

摘 要 对茶园及相邻林地土壤 N_2O 排放的垂直分布特征进行研究. 结果表明: 在 0~100 cm 土层, 茶园和林地土壤全氮(TN)、 N_2O 排放速率及积累量均随着土层增加而减少, 且茶园均值大于林地. 土壤 pH、TN、水溶性有机氮(WSON)、微生物生物量氮(MBN)、 NO_3^- -N 及 NH_4^+ -N 含量随着土层增加总体呈下降趋势, 茶园各土层 TN、WSON、MBN、 NO_3^- -N 及 NH_4^+ -N 含量显著大于林地, 而不同土层 pH 值均小于林地. 茶园和林地土壤 N_2O 排放速率与 TN、MBN 及 NH_4^+ -N 含量呈显著正相关, 而与 pH 相关性不显著. 茶园土壤 N_2O 排放速率与 NO_3^- -N 含量的相关性显著, 与 WSON 的相关性不显著, 而在林地土壤中呈相反趋势. 0~100 cm 土层内茶园 WSON/SON 和 N_2O -N/MBN 平均值大于林地, 而 MBN/SON 平均值小于林地. 这表明茶园土壤氮库有较高的代谢效率, N_2O 排放速率较高, 不利于土壤氮库的储量积累, 也不利于维持土壤质量和持续利用的潜力.

关键词 全氮; 水溶性有机氮; 微生物生物量氮; 铵态氮; 硝态氮; N_2O

文章编号 1001-9332(2015)09-2632-07 **中图分类号** Q493.8; S571.1 **文献标识码** A

Vertical distribution characteristics of N_2O emission in tea garden and its adjacent woodland.

FAN Li-chao, HAN Wen-yan, LI Xin, LI Zhi-xin (Tea Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Science, Hangzhou 310008, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2015, 26(9): 2632–2638.

Abstract: In this study, we determined the vertical distribution of N_2O emission rates in tea soils and its adjacent woodland soils. The results showed that total nitrogen contents, N_2O fluxes and cumulative emissions in the tea garden and woodland decreased with the increasing depth of the soil layer, and their average values were greater in tea garden than in woodland. Generally, pH, soil water soluble organic nitrogen (WSON), soil microbial biomass nitrogen (MBN), NO_3^- -N and NH_4^+ -N contents had a downward trend with the increasing depth of soil layer. The WSON, MBN, NO_3^- -N and NH_4^+ -N contents from each soil layer were greater in tea garden than in woodland, but the pH value in tea garden was lower than that in woodland. The N_2O emission rate was significantly positively related with TN, MBN and NH_4^+ -N contents, but not with pH value. The N_2O emission rate was significantly correlated with WSON content in woodland, but not in tea garden. The N_2O emission rate was significantly correlated with NO_3^- -N concentration in tea garden, but not in woodland. WSON/TN and N_2O -N/SMBN were averagely greater than in tea garden in woodland, and SMBN/TN was opposite. These results indicated that tea soil was not conducive to accumulate nitrogen pool, maintain soil quality and its sustainable use compared to woodland.

Key words: total nitrogen; water soluble organic nitrogen; soil microbial biomass nitrogen; NH_4^+ -N; NO_3^- -N; N_2O .

氧化亚氮(N_2O)可以参与各种光化学反应破坏臭氧层,其增温势能大约是 CO_2 的 296 倍、 CH_4 的 4 倍,是地球上重要的温室气体之一.土壤是众多 N_2O

排放源的主要来源之一,占大气 N_2O 总排放量的 65%^[1].土壤氮库不仅在维持土壤氮素肥力方面有重要意义,而且直接决定着土壤的供氮能力^[2].铵态氮(NH_4^+ -N)和硝态氮(NO_3^- -N)被认为是土壤 N_2O 排放的最直接影响因子,是土壤硝化作用和反硝化作用的底物.同时,土壤水溶性有机氮(soil water so-

* 国家自然科学基金面上项目(41171218)、中国农业科学院创新团队和浙江省茶产业重点创新团队项目(2011R50024)资助.

** 通讯作者. E-mail: hanwy@tricaas.com

2014-11-11 收稿,2015-05-04 接受.

luble organic nitrogen, WSON) 和微生物生物量氮 (microbial biomass nitrogen, MBN) 是土壤氮库的重要活性成分及植物养分的重要来源, 也对土壤 N_2O 的排放产生重要影响。WSON 可以提高土壤生物活性, 改善土壤肥力, 同时可以随水流失, 造成土壤氮素的淋失和环境污染^[3-4]。MBN 是土壤氮库有生命活性的成分, 对土壤条件变化非常敏感, 是土壤质量的重要指标^[5-6]。

茶树主要分布在亚热带丘陵地区, 是我国重要的经济产物。近年来, 茶农对茶叶品质和产量的过度追求, 大量施用氮肥, 使茶园土壤氮素逐年积累^[7-9]。有研究表明, 茶园土壤有较高的硝化和反硝化作用, 是土壤 N_2O 排放的重要源^[10-11]。近年对茶园 N_2O 排放的研究较多, 如 Han 等^[12] 研究表明, 高产茶园 N_2O -N 年排放量分别是中产和低产茶园的 2.6 和 7.2 倍。薛冬等^[7] 研究表明, 8、50 和 90 年茶园土壤的净硝化量分别是荒地的 7.4、11.3 和 9.9 倍。Huang 等^[11] 和林衣东等^[13] 研究表明, 施用氮肥可以显著增加茶园 N_2O 的排放速率。目前, 对茶园氮素和 N_2O 排放的垂直分布特征鲜见报道。因此, 本文以林地为对照, 研究茶园土壤全氮、水溶性有机氮、微生物生物量氮、铵态氮、硝态氮和 N_2O 排放的垂直分布特征, 为茶园合理施肥及减少温室气体排放提供科学参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本试验土样采于杭州中国农业科学院茶叶研究所 (30°14' N, 120°09' E) 的试验区高产茶园和相邻林地。试验区处于亚热带季风气候区, 全年气候温和湿润, 年平均气温 17.0 °C, 最低气温出现在 1 月, 为 1.7 °C, 最高气温出现在 7 月, 为 33.0 °C。年降雨量为 1533 mm, 降雨主要集中在 3—7 月, 这也是茶树生长的主要季节。试验茶园由林地改植而成, 茶树品种为‘龙井 43’, 树龄为 40 年左右, 西湖龙井茶叶产量为 $280 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 施 N (主要为尿素) 量为 $900 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 有机肥 (厩肥或饼肥) 施用量为 $2250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 茶园每年秋季进行一次轻修剪, 间隔 3~4 年重修剪一次, 修剪枝叶保留在茶园里。林地不施肥, 主要为木荷 (*Schima superba*)、樟树 (*Cinnamomum camphora*) 和苦槠树 (*Castanopsis sclerophylla*) 的混交林。供试土壤的成土母质为安山斑岩, 土壤为红壤。

1.2 样品采集与处理

土壤样品采集于 2014 年 6 月中旬, 采用土钻按“S”型分层采集茶园和林地土壤, 每层为 7~8 点混合样, 重复 3 次。分 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm 6 层取样。采集的土样迅速带回实验室, 过 2 mm 筛后装入密封袋, 储存于 4 °C 冰箱, 用于室内培养和水溶性氮、微生物生物量氮、硝态氮及铵态氮含量的测定。土壤微生物生物量氮测定前在温度 25 °C、相对湿度 85% 的恒温恒湿培养箱中预培养一周。部分样品自然风干测定土壤 pH, 另一部分研磨后过 0.154 mm 筛, 用于土壤全氮含量测定。挖取 3 个土壤剖面, 测定土壤容重。

1.3 N_2O 的排放试验及测量方法

将茶园和林地的新鲜过筛土壤含水量调节为田间持水量的 60%。取土样 10 g (以干质量计) 于 100 mL 三角瓶中, 用橡皮塞将三角瓶密封, 每个样地每层土样共有 12 个培养瓶放入 25 °C 恒温培养箱中培养。另有 3 个无土样培养瓶测定空气中 N_2O 浓度。在培养期间, 分别在第 1、3、7、14 天随机取出不同样地各土层中的 3 个三角瓶, 用 15 mL 负压储血真空管抽取气体样, 用于测定 N_2O 的排放速率。真空管内的 N_2O 浓度用气相色谱仪测定 (GC-14A, 日本岛津), 检测器为 63Ni 电子捕获器 (ECD), 色谱填充柱为 80/100 目 Porapak Q, 载气为甲烷-Ar 混合气^[13]。

1.4 分析方法

土壤全氮和有机碳采用 VarioMax CN 自动分析仪 (Elementar 公司, 德国) 测定。土壤 pH 值使用玻璃电极法 (DRION 3 STAR pH 计, Thermo 公司, 美国) 测定 (土液比 1:1)。土壤含水量采用过筛后土样烘干法 [$(105 \pm 2) ^\circ\text{C}$, 24 h] 测定。土壤田间持水量采用容量法测定^[14], 土壤容重采用环刀法测定, 土壤微生物生物量氮采用氯仿熏蒸- K_2SO_4 提取法测定^[15], 土壤水溶性总氮含量采用 TOC 分析仪 (multi N/C 2100, Analytikjena 公司, 德国) 测定 (浸提剂去离子水, 土液比 1:5, 振荡 30 min), 硝态氮和铵态氮含量用流动注射分析仪 (Flow Access 12.0, 荷兰 Skalar 公司) 测定 (浸提剂 $0.02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CaCl}_2$ 溶液, 土液比 1:1, 振荡 45 min)^[16]。土壤水溶性有机氮含量为土壤水溶性总氮与铵态氮和硝态氮之和的差值。

1.5 数据处理

采用 IBM SPSS 19.0 软件单因素方差分析 (one-way ANOVA) 对 N_2O 排放量、水溶性有机氮和微生物

物生物量氮等进行方差分析,相同样地不同土层间比较用最小显著差数法(LSD),不同样地相同土层间比较采用独立样本*t*检验($\alpha=0.05$).土壤N₂O排放速率均值为培养期间N₂O积累量与培养天数的商值.用SigmaPlot 12.0软件进行相关性分析及作图.图表中数据为平均值±标准差.

2 结果与分析

2.1 土壤全氮及氮储量分配比例

由表1可知,茶园和林地土壤全氮含量均随土层的增加而减少,且茶园各土层全氮含量均显著大于林地.在0~100 cm土层内,茶园全氮含量均值为1.16 g·kg⁻¹,是林地的2倍.与全氮分布规律相似,茶园和林地全氮储量分配比例随土层的增加而减少,但是二者分配比例大小不同.例如,在0~10 cm土层,茶园全氮储量分配比例为42.5%,显著大于林地(38.0%),而在10~20 cm土层,茶园为21.3%,显著小于林地(24.5%).茶园土壤C/N比值显著小于林地,且各土层比例大小基本相同.

2.2 土壤铵态氮、硝态氮、水溶性有机氮、微生物生物量氮及pH值的垂直分布

由表2可知,茶园不同土层硝态氮和铵态氮含量均显著大于林地,在0~100 cm土层,茶园铵态氮和硝态氮含量平均值分别为林地的3.2和1.7倍.茶园各土层WSON显著大于林地,茶园WSON最大值在10~20 cm土层,而林地在0~10 cm土层.在0~100 cm土层,茶园土壤水溶性有机氮含量平均值为100.22 mg·kg⁻¹,显著大于林地含量,是林地的3.1倍.在0~100 cm土层,茶园微生物生物量氮均值为19.64 mg·kg⁻¹,显著大于林地,是林地的1.7倍.林地pH值随着土层的增加而增加;而茶园0~10 cm土层pH大于10~60 cm土层,小于60~100 cm土层.在0~100 cm土层内,茶园pH均值为3.41,小于林地3.63.

2.3 土壤N₂O的排放

由图1可知,茶园和林地N₂O的排放速率随着土层增加及培养时间延长而减少.茶园不同土层间N₂O排放速率变幅大于林地,林地不同土层间N₂O排放速率在前期基本相同,但随着培养时间的延长变幅逐渐增加.N₂O积累量随着土层的增加而减少,而且茶园各土层N₂O的积累量均大于林地.在培养期间(14 d),0~100 cm土层内茶园N₂O总积累量

表1 茶园和林地不同土层土壤全氮、全氮储量分配比例及C/N
Table 1 Soil total N and its distribution proportion and C/N ratio among different soil layers in tea garden and woodland

土层 Soil layer (cm)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)		全氮储量分配比例 Total N distribution proportion (%)		C/N	
	I	II	I	II	I	II
0~10	4.94±0.56Aa	2.20±0.41Ba	42.5±2.9 Aa	37.9± 2.0Ba	8.2±2.5 Ba	11.1±1.9Aab
10~20	2.48±0.42Ab	1.42±0.35Bb	21.3±3.9 Ab	24.5±1.2Bb	8.7±2.3Ba	10.2±2.7Acd
20~40	1.26±0.26Ac	0.82±0.54Bc	10.8±1.2Ac	14.2±1.3Bc	8.1±1.8Ba	10.7±2.6Ab
40~60	1.17±0.25Ac	0.56±0.12Bcd	10.1±1.2Ac	9.7±0.7Ad	8.7±2.1Ba	10.5±1.9Abc
60~80	1.09±0.12Ac	0.40±0.23Bd	9.4±1.0Ac	6.9±1.0Be	6.5±2.8Bb	11.4±2.7Aa
80~100	0.69±0.10Ad	0.39±0.24Bd	5.9±0.8Ad	6.8±0.6Ae	8.5±1.3Ba	9.8±2.1Ad
0~100	1.16	0.58	100	100	8.1	10.6

I: 茶园 Tea garden; II: 林地 Woodland. 不同大写字母表示同一土层不同样地间差异显著,不同小写字母表示同一样地不同土层间差异显著($P<0.05$) Different capital letters meant significant difference between tea garden and woodland at the same soil layer, and different small letters meant significant difference among different soil layers at the same plot at 0.05 level. 下同 The same below.

表2 茶园和林地不同土层土壤水溶性有机氮、微生物生物量氮及土壤pH值的分布
Table 2 Distribution of WSON, MBN and pH value among different soil layers in tea garden and woodland

土层 Soil layer (cm)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N (mg·kg ⁻¹)		铵态氮 NH ₄ ⁺ -N (mg·kg ⁻¹)		水溶性有机氮 WSON (mg·kg ⁻¹)		微生物生物量氮 MBN (mg·kg ⁻¹)		pH	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
0~10	25.91±3.91Aa	5.34±0.52Ba	1.08±0.41Aa	0.59±0.39Ba	98.25±8.74Aa	63.29±6.93Ba	39.53±7.46Aa	16.33±7.29Ba	3.40±0.06Aa	3.42±0.01Aa
10~20	17.45±2.83Ab	4.62±0.36Bb	0.68±0.40Ab	0.40±0.26Ab	141.01±10.44Ab	33.67±9.02Bb	21.51±5.19Ab	13.24±9.67Bb	3.28±0.03Ab	3.47±0.01Bab
20~40	13.71±0.92Ac	4.76±0.49Bb	0.58±0.23Ac	0.40±0.19Bb	113.88±6.53Ac	39.96±3.26Bc	25.81±3.14Ac	12.19±4.68Bb	3.37±0.02Aa	3.53±0.02Bbc
40~60	9.81±0.67Ad	3.12±0.33Bc	0.60±0.19Ac	0.29±0.12Bc	105.98±7.31Aa	32.10±5.31Bb	16.53±1.56Ad	12.58±8.67Bb	3.34±0.02Aab	3.61±0.02Bc
60~80	6.35±1.30Ae	3.33±0.45Bc	0.42±0.14Ad	0.28±0.09Bc	83.35±5.63Ab	15.97±2.30Bd	7.65±2.91Ae	8.58±4.64Ac	3.50±0.04Ac	3.79±0.01Bd
80~100	4.76±0.66Af	2.29±0.36Bd	0.42±0.09Ad	0.23±0.11Bc	58.85±3.98Ac	9.49±1.34Be	6.66±6.87Ae	7.43±6.01Ac	3.56±0.01Ac	3.98±0.01Be
0~100	13.00	3.91	0.63	0.37	100.22	32.41	19.64	11.72	3.41	3.63

WSON: Water soluble organic nitrogen; MBN: Microbial biomass nitrogen. 下同 The same below.

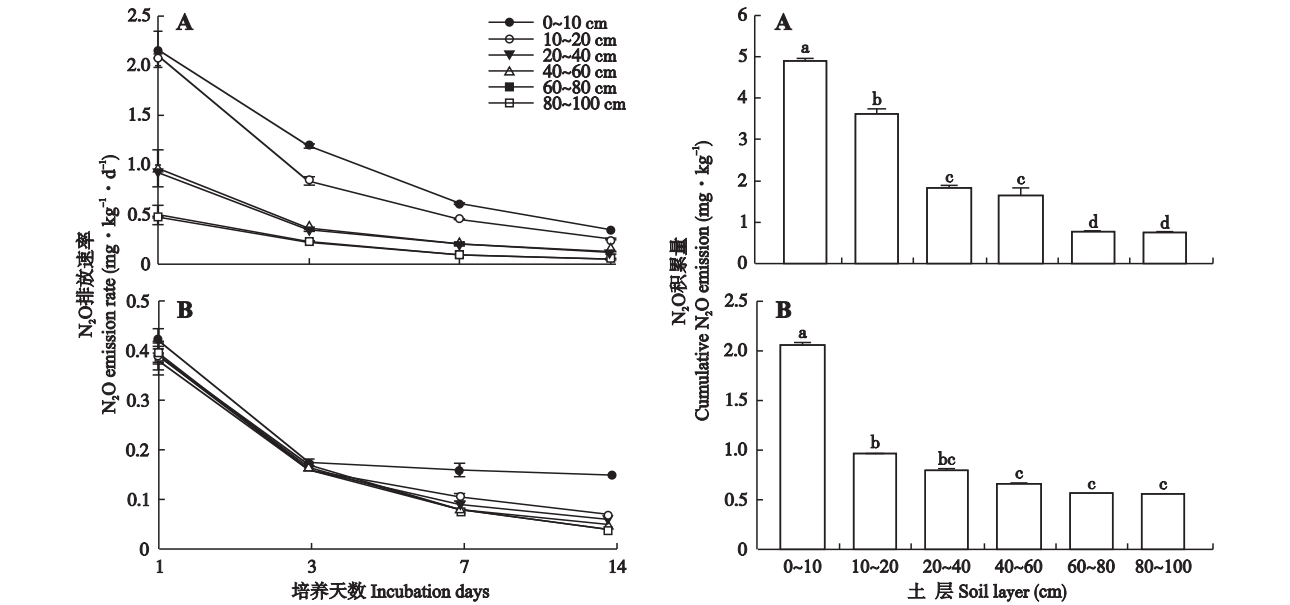


图 1 茶园和林地不同土层 N₂O 的排放速率及积累量
Fig.1 N₂O emission rate and accumulation at different soil layers at tea garden and woodland.
A: 茶园 Tea garden; B: 林地 Woodland. 不同小写字母表示不同土层间差异显著 ($P<0.05$) Different small letters meant significant difference among different soil layers at 0.05 level.

为 13.52 mg · kg⁻¹, 显著大于林地 5.62 mg · kg⁻¹.

2.4 土壤 N₂O 排放速率影响因素

茶园和林地土壤 N₂O 排放速率与土壤全氮、微生物生物量氮、NH₄⁺-N 含量均具有显著相关性, 而与 pH 的相关性均不显著. 茶园土壤 N₂O 排放速率与土壤水溶性有机氮含量的相关性不显著, 而林地 N₂O 排放速率与土壤水溶性有机氮含量的相关性显著, 茶园土壤 N₂O 排放速率与 NO₃⁻-N 含量的相关性

显著, 而林地土壤 N₂O 排放速率与硝态氮含量的相关性不显著 (表 3).

2.5 不同土层各氮素形态之间的比值

由表 4 可知, 茶园和林地 WSON/TN、MBN/TN 和 N₂O-N/MBN 在不同土层间没有明显的规律. 在 0~100 cm 土层内, 茶园 WSON/TN 及 N₂O-N/MBN 平均值分别为林地的 1.5 和 1.4 倍, 而茶园 MBN/TN 平均值小于林地, 为林地的 84.0%.

表 3 土壤 N₂O 排放速率与土壤全氮、水溶性有机氮、微生物生物量氮、硝态氮及铵态氮的相关系数
Table 3 Correlation coefficients between N₂O emission rate with TN, WSON, MBN, NO₃⁻-N and NH₄⁺-N

		全氮 Total N	水溶性有机氮 WSON	微生物生物量氮 MBN	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N
N ₂ O 排放速率	I	0.951 **	0.554	0.898 *	0.981 **	0.952 **
N ₂ O emission rate	II	0.955 **	0.904 *	0.842 *	0.769	0.951 **

* $P<0.05$; ** $P<0.01$.

表 4 不同土层各氮素形态的比例
Table 4 Ratio among different nitrogen forms at different soil layers (%)

土层 Soil layer (cm)	水溶性有机氮/全氮 WSON/TN		微生物生物量氮/全氮 MBN/TN		氧化亚氮氮/微生物生物量氮 N ₂ O-N/MBN	
	I	II	I	II	I	II
0~10	1.99±0.51Ae	2.88±0.32Ad	0.80±0.03Ade	0.74±0.02Ae	0.56±0.02Ab	0.58±0.03Aa
10~20	5.70±0.32Ad	2.37±0.27Be	0.87±0.03Acd	0.93±0.05Ad	0.75±0.03Aa	0.34±0.03Bb
20~40	9.02±0.63Aa	4.87±0.44Bb	2.04±0.16Aa	1.49±0.08Bc	0.32±0.04Ad	0.31±0.04Ab
40~60	9.03±0.95Aa	5.70±0.49Ba	1.41±0.09Ab	2.23±0.24Ba	0.46±0.01Ac	0.25±0.02Bc
60~80	7.64±0.60Ab	4.01±0.31Be	0.70±0.01Ae	2.16±0.10Ba	0.46±0.03Ac	0.30±0.01Bbc
80~100	8.17±0.98Ac	2.42±0.27Be	0.96±0.02Ac	1.90±0.05Bb	0.48±0.04Ac	0.34±0.00Bb
0~100	5.17	3.36	1.01	1.22	0.52	0.37

3 讨 论

本研究表明,茶园和林地土壤全氮含量均随着土层的增加呈下降趋势,这与很多研究结果相同^[6,17].这是由于土壤全氮主要来源于植物残体和有机肥的分解与合成的有机质,而植物残体在土体中的分布随土层增加逐渐减少,且植物残体和有机肥多在土壤表层富集,所以 0~10 cm 土层全氮含量显著大于下层土壤含量.土壤各土层全氮储量分配比例表明,在 0~10 cm 土层中,茶园和林地全氮储量分别为 42.5% 和 37.9%,均显著大于其他土层.在 0~100 cm 土层内,茶园土壤全氮含量均值显著大于林地,主要原因是茶园每年不仅有大量的修剪枝叶以及施用大量的有机肥(主要为商品有机肥和菜饼),而且施用大量的化学肥料(主要为尿素).有研究表明,有机肥料和化学肥料配施可以更好地促进土壤有机氮的积累^[18].茶园和林地全氮储量分配比例在相同土层中的分配比例不同,表明土地利用方式的转变影响土壤全氮储量的同时还改变了氮素在土壤剖面内的分布.

对于某一特定土壤类型,土壤 C/N 基本为一个常数^[19].在本研究中,茶园 C/N 在 8.1 附近波动,显著小于林地(10.6),而茶园全氮、水溶性有机氮和微生物生物量氮含量平均值均显著大于林地.表明茶园每年施用大量的化学肥料使茶园 C/N 减少,在有机质丰富的条件下,为土壤微生物提供了大量可以快速利用的氮源,且茶园施肥翻耕等措施改善了土壤物理结构,促进了微生物的生长,使微生物量显著增加,进而加速了有机质的分解及有机氮矿化,从而形成较多的小分子有机氮化合物,使水溶性有机氮增加^[4].在茶园中,0~10 cm 土层水溶性有机氮含量小于相邻土层,可能是由于水溶性有机氮的地表径流和地下渗漏特性造成的^[20].同时,茶园土壤表层高铝高多酚的修剪枝叶相对难于矿化,而且茶园施肥方式为沟施(深度为 10~20 cm)也会有一定的影响.另外,本研究在 0~100 cm 土层内,茶园 pH 平均值小于林地,而微生物生物量氮平均值显著大于林地的结果与 Han 等^[15]的研究结果相似.Han 等^[15]研究表明,由于茶园大量施用化学肥料及茶树有聚铝的生长特性,大量的高铝高多酚的修剪枝叶和立枯物回归土壤,使茶园土壤 pH 显著降低,但是低 pH 的土壤环境没有使土壤微生物量减少,反而有大量的微生物种群适应了茶园土壤酸性环境.传统理论认为,土壤硝化速率与 pH 呈显著正相关,酸性的森

林土壤中 NO_3^- -N 含量很低^[21].而茶园土壤尽管 pH 很低,却积累了大量的 NO_3^- -N.这主要是由于:1) 茶园土壤施肥量较高,特别是施氮量平均为 $533 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,个别甚至高达 $2600 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[9];2) 茶树是典型的喜铵厌硝植物,当土壤中同时存在 NH_4^+ 和 NO_3^- 时,会优先吸收 NH_4^+ ,即茶树对 NH_4^+ 的吸收和代谢较快^[10];3) 茶园土壤中存在大量的硝化古菌,且硝化古菌的数量与硝化势呈显著正相关,使茶园土壤仍有较强的硝化作用,从而导致 NO_3^- -N 积累^[22].

Tokuda 等^[23]研究表明,茶园为 N_2O 的重要排放源,排放量为 $25.22 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; Han 等^[12]研究表明,茶园土壤 N_2O -N 的年排放量为 $4.28 \sim 11.78 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,是林地的 $1.57 \sim 11.33$ 倍; Shin-ichi 等^[24]研究表明,茶园土壤 N_2O -N 的释放速率高达 $3.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,显著高于针叶林($0.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).本研究中,0~100 cm 土层内茶园土壤 N_2O 的积累量显著高于林地,是林地的 2.4 倍.这主要是由于相比林地和其他作物,高品质和高产量的茶叶需要茶树获得更多的氮肥来维持^[25],而高产茶园氮肥的使用量常常是过量的^[26],过量的氮肥能显著增加 N_2O 的排放速率^[27].在本研究中,茶园和林地 N_2O 的排放速率随着培养时间的延长而减少.这与林衣东等^[13]对茶园、林地和菜地土壤 N_2O 排放的研究结果相似.这可能是由于随着培养时间的延长,土壤活性物质或培养瓶中氧气逐渐消耗,限制了微生物活性及微生物量,使土壤硝化作用和反硝化作用减弱, N_2O 的排放速率降低.在培养期间, N_2O 的排放速率随着土层的增加而减少,这与土壤全氮和微生物生物量氮在土层中的分布特征有密切的关系,土壤全氮是土壤氮素矿化的源和库,其含量决定土壤的供氮能力,且微生物生物量氮是土壤氮库中有生命活性的部分,是土壤氮素矿化的驱动力.本研究得出,茶园和林地 N_2O 的排放速率与土壤全氮及微生物生物量氮有显著的相关性,很好地证明了这一点(表 3).李永夫等^[28]研究表明,毛竹林土壤在施肥 1 个月和 6 个月后, N_2O 的排放量与土壤水溶性氮均有显著的相关性.本研究中,林地土壤 N_2O 的排放速率与土壤水溶性有机氮相关性显著,而茶园不显著.出现这种差异的主要原因是,水溶性有机氮虽可以被微生物直接利用但不直接调控 N_2O 的排放,且水溶性有机氮在土壤中的分布较易受植被类型、管理措施、土壤结构和降雨等因素的影响,而

N_2O 产生的途径为硝化作用 (NH_4^+ 的氧化) 和反硝化作用 (NO_3^- 的还原)^[29]。一般来说, 在有氧条件下, 硝化微生物活性较高, 土壤以硝化作用为主; 在缺氧或无氧条件下, 反硝化细菌活性增强, 土壤以反硝化作用为主^[30]。本研究中, 茶园和林地 N_2O 的排放速率与 NH_4^+ -N 含量呈显著正相关, 茶园土壤 N_2O 排放速率与硝态氮 (NO_3^- -N) 的相关性显著, 林地土壤 N_2O 排放速率与硝态氮 (NO_3^- -N) 呈正相关, 但相关性不显著 (表 3), 表明茶园和林地 N_2O 的排放途径包含土壤硝化作用和反硝化作用。考虑实际田间土壤剖面结构特征, N_2O 排放的机制可能表现为: 在土壤表层通气条件较好时, 土壤 N_2O 的排放主要以土壤硝化作用为主; 随着土壤深度的增加, 氧气供应不足, 土壤反硝化作用增强。而且茶园土壤的反硝化能力显著大于林地。

WSO/TN 可以反映土壤有机氮库的稳定性, 除 0~10 cm 土层茶园 WSO/TN 小于林地外, 而其他土层均显著大于林地, 表明茶园土壤氮库稳定性较差, 更容易受降雨和人为干扰等影响而损失。土壤微生物量氮是植被可利用的重要氮源, 丰富的微生物量氮可以促进植被的生长, 加强植被与土壤之间的氮交换, 即 MBN/TN 高有利于土壤氮库的积累。0~100 cm 土层内茶园 MBN/TN 小于林地, 虽然茶园土壤氮库储量比林地丰富, 但是林地的土壤氮库更稳定, 更利于氮素的积累。 N_2O -N/MBN 可以表示土壤氮库的代谢效率, 意味着微生物硝化和反硝化作用消耗的氮与建造微生物细胞的氮分配比例大小。在 0~100 cm 土层内茶园 N_2O -N/MBN 显著地大于林地, 表明茶园土壤氮素有较高的代谢效率, 而茶园土壤硝化和反硝化作用相对较强, 不利于土壤氮库储量积累, 也不利于维持土壤的质量和持续利用的潜力。相反, 林地土壤硝化和反硝化作用较低, 有利于土壤氮库的积累。在茶园生产管理过程中, 科学合理的施氮水平及平衡供应土壤养分对提高氮素利用率、减少土壤氮素损失及由此产生的环境污染有重要意义。

参考文献

- [1] Styles RV, Seitzinger SP, Kroeze C. Global distribution of N_2O emissions from aquatic systems: Natural emissions and anthropogenic effects. *Chemosphere: Global Change Science*, 2000, **2**: 267–279
- [2] Ju X-T (巨晓棠), Liu X-J (刘学军), Zhang F-S (张福锁). Effects of long term fertilization on soil organic nitrogen fractions. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农

- 业科学), 2004, **37**(1): 87–91 (in Chinese)
- [3] Perakis SS, Hedin LO. Nitrogen loss from unpolluted South American forests mainly via dissolved organic compounds. *Nature*, 2002, **415**: 416–419
- [4] Sheng W-X (盛卫星), Jiang P-K (姜培坤), Wu J-S (吴家森), *et al.* Effect of fertilization on water-soluble organic N in the soils under chestnut stands. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2008, **44**(10): 164–167 (in Chinese)
- [5] Bai J-H (白军红), Deng W (邓伟), Zhu Y-M (朱颜明), *et al.* Spatial distribution characteristics and ecological effects of carbon and nitrogen of soil in Huolin River catchment wetland. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(9): 1494–1498 (in Chinese)
- [6] Dang Y-A (党亚爱), Li S-Q (李世清), Wang G-D (王国栋), *et al.* Distribution characteristics of soil total nitrogen and soil microbial biomass nitrogen for the typical types of soils on the Loess Plateau. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2007, **13**(6): 1020–1027 (in Chinese)
- [7] Xue D (薛冬), Yao H-Y (姚槐应), Huang C-Y (黄昌勇). Characteristics of mineralization and nitrification in soils of tea gardens different in age. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2007, **44**(2): 373–378 (in Chinese)
- [8] Han W-Y (韩文炎), Ruan J-Y (阮建云), Lin Z (林智), *et al.* The major nutritional limiting factors in tea soils and development of tea specialty fertilizer series. *Journal of Tea Science* (茶叶科学), 2002, **22**(1): 70–74 (in Chinese)
- [9] Han W-Y (韩文炎), Li W (李强). Tea garden application present situation and pollution-free tea garden fertilizer technology. *China Tea* (中国茶叶), 2002, **6**(24): 29–31 (in Chinese)
- [10] Han W-Y (韩文炎). Study on Microbial Biomass, Nitrification and Denitrification in Tea Garden Soils. PhD Thesis. Hangzhou: Zhejiang University, 2012 (in Chinese)
- [11] Huang Y, Li YY, Yao HY. Nitrate enhances N_2O emission more than ammonium in a highly acidic soil. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, **14**: 146–154
- [12] Han WY, Xu JM, Wei K, *et al.* Estimation of N_2O emission from tea garden soils, their adjacent vegetable garden and forest soils in eastern China. *Environmental Earth Sciences*, 2013, **70**: 2495–2500
- [13] Lin Y-D (林衣东), Han W-Y (韩文炎). N_2O emission from soils with different stands. *Journal of Tea Science* (茶叶科学), 2009, **29**(6): 456–464 (in Chinese)
- [14] Yang M-Z (杨明臻), Lin Y-D (林衣东), Han W-Y (韩文炎). Effect of nitrogen fertilizer on basic respiration in tea garden soils. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2012, **43**(6): 1355–1360 (in Chinese)
- [15] Han WY, Kemmitt SJ, Brookes PC. Soil microbial biomass and activity in Chinese tea gardens of varying stand age and productivity. *Soil Biology & Biochemistry*,

- 2007, **39**: 1468–1478
- [16] Zou Y-L (邹玉亮). Soluble Organic Nitrogen in Tea (*Camellia sinensis*) Garden Soil and Its Impact Factors. Master Thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012 (in Chinese)
- [17] Dang Y-A (党亚爱), Wang G-D (王国栋), Li S-Q (李世清). The changing characteristics of profile distribution of soil organic nitrogen component of the typical soil types on the Loess Plateau. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2011, **44**(24): 5021–5030 (in Chinese)
- [18] He X-H (郝晓晖), Liu S-L (刘守龙), Dong C-L (童成立), *et al.* The influence of long-term fertilization on microbial biomass nitrogen and organic nitrogen fractions in paddy soil. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2007, **40**(4): 757–764 (in Chinese)
- [19] Wu J, Joergensen RG, Pommerening B, *et al.* Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction: An automated procedure. *Soil Biology & Biochemistry*, 1990, **22**: 1167–1169
- [20] Wu J-S (吴家森), Xu K-P (许开平), Ye J (叶晶), *et al.* Losses of water soluble organic carbon and nitrogen in soils under *Phyllostachys praecox* stands with different fertilization. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2014, **33**(1): 128–133 (in Chinese)
- [21] Stark JM, Hart SC. High rates of nitrification and nitrate turnover in undisturbed coniferous forests. *Nature*, 1997, **385**: 61–64
- [22] Yao HY, He ZL, Huang CY. Phospholipid fatty acid profiles of Chinese red soils with varying fertility levels and land use histories. *Pedosphere*, 2001, **11**: 97–103
- [23] Tokuda S, Hayatsu M. Nitrous oxide flux from a tea field amended with a large amount of nitrogen fertilizer and soil environmental factors controlling the flux. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2004, **50**: 365–374
- [24] Shin-ichi T, Masahito H. Nitrous oxide emission potential of 21 acidic tea field soils in Japan. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2001, **47**: 637–642
- [25] Han WY, Ma LF, Shi YZ, *et al.* Nitrogen release dynamics and transformation of slow release fertiliser products and their effects on tea yield and quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2008, **88**: 839–846
- [26] Ma L-F (马立锋), Chen H-J (陈红金), Shan Y-J (单英杰), *et al.* Status and suggestions of tea garden fertilization on main green tea-producing counties in Zhejiang Province. *Journal of Tea Science* (茶叶科学), 2013, **33**(1): 74–84 (in Chinese)
- [27] Jiao Y (焦燕), Huang Y (黄耀), Zong L-G (宗良纲), *et al.* Impact of different levels of nitrogen fertilizer on N₂O emission from different soils. *Environmental Science* (环境科学), 2008, **29**(8): 2094–2098 (in Chinese)
- [28] Li Y-F (李永夫), Jiang P-K (姜培坤), Liu J (刘娟), *et al.* Effect of fertilization on water-soluble organic C, N and emission of greenhouse gases in the soil of *Phyllostachys edulis* stands. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2010, **46**(12): 165–170 (in Chinese)
- [29] Wrage N, Velthof GL, van Beusichem ML, *et al.* Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, **33**: 1723–1732
- [30] Muller C, Stevens RJ, Laughlin RJ, *et al.* Microbial processes and the site of N₂O production in a temperate grassland soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, **36**: 453–461

作者简介 范利超,男,1988年生,硕士研究生.主要从事土壤呼吸研究. E-mail: flcxsy@126.com

责任编辑 孙菊
