

张婷¹ 周金蓉¹ 冯廉洁¹ 陈玲¹ 蒋静艳¹

土壤生化特性在模拟氮沉降条件下对土壤呼吸和 N₂O 排放的影响

摘要

中国东南地区是高氮沉降区,氮沉降对不同土壤碳氮循环的影响不同.本研究目的是确定哪些土壤生化因子在氮输入对土壤呼吸及 N₂O 排放影响方面起了决定性作用.本研究采集江苏省 13 种不同土地利用方式下的土壤,分析其理化性质及微生物特征差异,通过室内培养试验,在恒温(25 ℃)恒湿(土壤水分 0.30 g·g⁻¹,模拟旱地条件)条件下,同步研究了不同土壤内源和外加氮源(NH₄NO₃)条件下的土壤呼吸和 N₂O 排放情况.研究表明:氮添加显著促进 CO₂ 排放的土壤具有较低的黏粒成分、土壤微生物碳和微生物碳氮比,较高的土壤基础呼吸、土壤有效氮、细菌和真菌数量等特性;氮添加显著促进 N₂O 排放的土壤具有较高的土壤基础呼吸、较低的内源 N₂O 排放和较低的土壤总氮、有效氮、放线菌和真菌数量等特性.无论是否添加氮源,土壤呼吸主要驱动因子均为土壤细菌和 pH.未添加氮源条件下,N₂O 排放主要驱动因子为土壤细菌和铵态氮;添加氮源条件下,N₂O 排放主要驱动因子仅为土壤细菌.土壤内源 N₂O 排放和土壤基础呼吸无显著相关关系($P > 0.05$),添加外源氮后,N₂O 排放和土壤呼吸具有极显著正相关关系($P < 0.01$).外源单位氮的 CO₂ 排放量与土壤有机碳、全氮、真菌数量呈显著正相关($P < 0.05$),与微生物碳氮比(MC/MN)呈显著负相关($P < 0.05$);外源单位氮的 N₂O 转化率与土壤细菌数量呈极显著正相关($P < 0.01$).逐步回归分析表明外源单位氮的 CO₂ 排放量主要取决于 MC/MN;外源单位氮的 N₂O 转化率主要取决于土壤细菌数量.MC/MN 和土壤细菌数量分别是旱地条件下土壤呼吸和 N₂O 排放对模拟氮沉降响应的决定因子.

关键词

土壤性质;土壤微生物;土壤呼吸;
N₂O 排放;氮添加

中图分类号 XS11

文献标志码 A

收稿日期 2021-12-27

资助项目 国家自然科学基金(41375150, 41675148)

作者简介

张婷,女,硕士生,主要从事全球变化生物学方面的研究.2020103034@stu.njau.edu.cn

蒋静艳(通信作者),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事环境污染与全球变化方面的研究.lilacjy@njau.edu.cn

0 引言

人为源导致大量活性氮进入大气层,经过一系列转化后,部分以干湿沉降的形式回到地表,对陆地生态系统造成了很大的影响^[1].全球氮沉降逐年增加,从 1850 年至今,陆地生态系统可溶性氮沉降增加了 3 倍,海洋可溶性氮沉降增加了 2 倍,未来还将逐渐增加^[2].近几十年中国氮沉降也呈急剧增加趋势,从 1961 年的 12.64 kg·hm⁻²·a⁻¹(以 N 计,下同)增加到 2008 年的 20.07 kg·hm⁻²·a⁻¹^[3-4].无论是实测结果还是模型模拟均表明氮沉降有巨大的时空变异性,反映在我国就是氮沉降量西低东高^[5-7],2013 年的定点实测结果表明中国东南部氮湿沉降量均大于 60 kg·hm⁻²·a⁻¹,而西北部地区则小于 9 kg·hm⁻²·a⁻¹^[5].2000—2014 年间的实测结果也表明整个扬子江流域无机氮沉降量较高,年均均为 33.2 kg·hm⁻²·a⁻¹^[7],因干湿沉降对氮沉降的贡献难以定量,故此结果还有很大的不确定性.

大量氮沉降将对土壤碳氮循环产生影响^[1].CO₂和 N₂O 作为两大温室气体,也是土壤碳氮循环的中间产物,氮沉降对其有何影响?已有报道认为土壤温室气体排放对氮沉降的响应主要取决于土壤氮的饱和度和氮沉降水平^[8-11].在氮饱和的土壤中,氮增加减少了土壤呼吸^[11-12]和 CH₄吸收速率^[10],增加了土壤 N₂O 的排放^[9].在氮限制的松树林土壤中,氮增加对土壤呼吸和 CH₄吸收速率没有显著影响,高氮也增加了土壤 N₂O 的排放^[8-10].长期氮沉降对温带森林土壤呼吸和 N₂O 排放因季节而异.氮增加对温带森林生长季和春季冻融期 CO₂ 排放均无显著影响,但在生长季降低了 72.8%~85.7%的 N₂O 排放通量,而在冻融期增加了 11.2~17.8 倍 N₂O 排放^[13].此外也有报道认为短期氮沉降处理对青藏高原高山草甸 CO₂和 N₂O 没有显著影响^[14].另有研究则认为氮沉降无论是对农业土壤还是森林土壤均增加了 N₂O 的排放,但 CO₂排放对氮增加不敏感,CH₄和 N₂O 是氮增加的敏感响应因子^[15-16].上述结果出现了不一致性,主要源于研究对象的单一性.土壤 CO₂和 N₂O 均来源于土壤微生物的作用,不同土地利用方式下的土壤生化性质不同^[17],其对氮沉降的响应可能不同^[18].已有研

1 南京农业大学 资源与环境科学学院,南京,210095

究也表明土壤呼吸和 N₂O 排放与土壤理化性质有关^[18-19],如土壤 pH、有效氮、土壤质地、土壤碳氮比(C/N)等为影响 N₂O 排放的重要因子^[18,20],土壤 CO₂排放与土壤碳含量和阳离子交换量呈正相关,与游离铁含量呈负相关^[21].但结合生物特征分析氮添加条件下不同土壤特性对土壤呼吸和 N₂O 排放影响的研究尚不多见.

本研究基于高氮沉降地区江苏省不同土地利用方式下(包括农、林、草地及果园和竹园)的 13 种土壤不同生物和理化特性,通过模拟氮沉降的室内培养试验,分析不同土地利用方式下的土壤呼吸和 N₂O 排放对氮添加的响应,确定氮添加条件下影响土壤呼吸和 N₂O 排放的主要土壤决定因子,结果可为了解在氮沉降的条件下,不同土壤特性对土壤呼吸和 N₂O 排放的影响提供科学依据.

1 材料与方 法

1.1 供试材料

江苏省地处中国东部(116°18'~121°57'E,

30°45'~35°20'N),地形以平原为主,境内年降雨量在 1 000 mm 左右,年均气温 13~16℃.江苏地理上跨越了南北地区,气候和植被也同时具有南方和北方的特征.不同土地利用方式主要包括林地、草地、农田、果园和竹林等.供试土壤共 13 种,分别代表江苏省境内不同土地利用方式下的土壤,包括了林地(W)、农田(F)、草地(M)、果园(O)及竹林(B)等.采样地点如图 1 所示,从北至南分别为徐州 2 个(F1 和 W1)、连云港 2 个(F2 和 W2)、涟水 3 个(O1、O2 和 F3)、洪泽 1 个(M1)、盐城 1 个(M2)、南京 3 个(W3、W4 和 F4)和宜兴 1 个(B1).

供试土壤采自地表 0~20 cm,多点混合后,除去植物残体等杂物,取部分新鲜土样,放于 4℃冰箱中冷藏,供有效氮、土壤微生物等指标的测定,另取部分土样风干后过筛,供土壤 pH 值、质地、有机碳、全氮等指标的测定.

1.2 实验设计

将供试土样过筛混匀后称取 100 g(以烘干土质

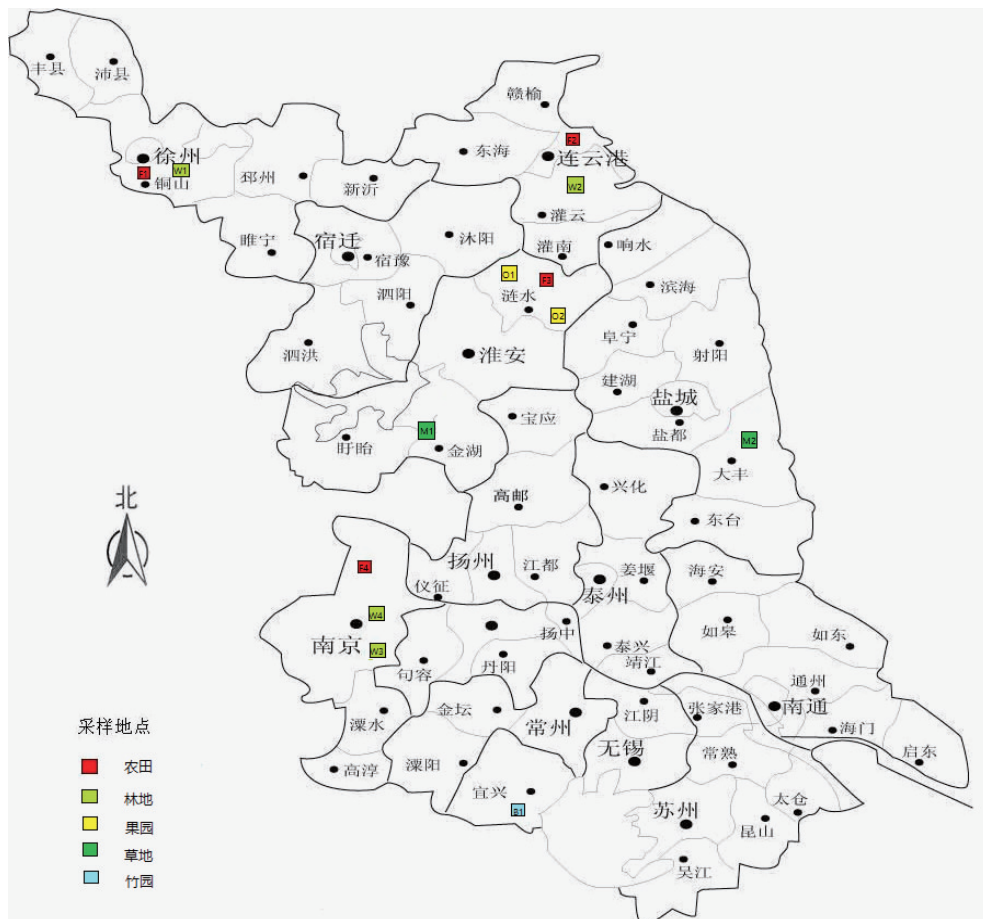


图 1 采样地点示意

Fig. 1 Locations of the sampling sites

量计)置于 590 mL 的玻璃瓶内,调节并保持土壤水分分为 0.30 g·g⁻¹(模拟旱地条件),每个土样中添加 6.349 mg NH₄NO₃(相当于江苏省的年平均氮沉降量 50 kg·hm⁻²),置于 25 °C 培养箱中培养.同时做对照,即每种土样不添加氮源直接进行室内培养.加氮处理代码为 T,不加氮处理代码为 CK.每处理 3 重复,恒温恒湿(重量法调节)培养.CO₂和 N₂O 的排放速率测定采用间歇密闭培养-气相色谱法.每天采样 1 次,每次取样前抽取背景样品,并用胶塞封口,密闭培养 2~4 h,用外接三通阀的 60 mL 的注射器从培养瓶上部空间抽取 40 mL 样品气体,采完气后敞口继续恒温恒湿培养.至每种土样 T 和 CK 的 CO₂和 N₂O 气体连续 2 次排放速率无差异为止,共培养 20 d.

气体样品用改装的 Agilent 4890D 气相色谱仪同步测定 N₂O 和 CO₂的浓度^[22].N₂O 测定所用载气为 99.999% 高纯氩甲烷 (Ar₂和 CH₄的体积比为 95:5),检测器为电子捕获检测器(ECD),检测温度为 330 °C.CO₂测定所用载气为 99.999% 高纯氮,检测器为氢火焰检测器(FID),检测温度为 200 °C.根据气体的分子量、培养温度、培养容器内气体的有效空间、培养时间内气体的浓度差和培养容器内烘干土的质量,计算各气体的排放速率,具体计算公式如下:

$$F = \Delta m / (W \cdot \Delta t) = \rho \cdot V \cdot \Delta c / (W \cdot \Delta t), \quad (1)$$

式中: F 为气体排放速率; V 为培养容器内气体的有效空间(L); ρ 为气体密度(g·L⁻¹), $\rho = (\text{气体相对分子质量} \times 273) / [22.4 \times (273 + T)]$; Δc 为 Δt 时间内的气体浓度差; T 为培养温度(°C); W 为培养容器内的烘干土质量(g); Δt 为培养时间(h).CO₂和 N₂O 的累积排放量由其每天平均排放速率和培养时间累积计算得出.

1.3 土壤理化性质及微生物特征的测定

土壤理化性质按文献[23]测定:土壤 pH 值用电位法(水土质量比 2.5:1)测定;土壤质地(TEXTURE)用吸管法测定;土壤有机碳(SOC)用重铬酸钾氧化-容量法测定;全氮(TN)用开氏消煮法测定;铵态氮(NH₄⁺-N)用靛酚蓝比色法测定;硝态氮(NO₃⁻-N)用紫外分光光度法测定;土壤微生物碳氮用氯仿熏蒸硫酸钾浸提,浸提出的微生物碳(MC)用重铬酸钾外加热法测定,微生物氮(MN)用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定.微生物碳氮计算公式如下:

$$MC = E_C / 0.38, \quad (2)$$

$$MN = E_N / 0.45, \quad (3)$$

其中: E_C, E_N 分别为熏蒸土样的有机碳量或全氮与未熏蒸土样之间的差值(mg·kg⁻¹);0.38、0.45分别为氯仿熏蒸杀死的微生物体中的碳(C)或氮(N)被浸提出来的比例.土壤微生物细菌(BA)、放线菌(AC)和真菌(FUN)数量采用稀释平板涂布法测定^[24-25].

1.4 数据处理

结果用平均值±标准误表示.用 OriginPro 2021 软件制作图表,用 SPSS 23.0 进行统计分析.

2 结果与分析

2.1 供试土壤生化特征

表 1 所示的是供试土壤的土壤类型、利用方式及各种基本理化、生物性质.13 种供试土壤包括黄棕壤(W3、F4)、褐土(F1、W1)、棕壤(F2、W2)、潮土(G1、G2、F3)、棕红壤(B1)、黄褐土(W4)、草甸土(M1)、滨海盐土(M2)等江苏省主要土壤类型,包括农田(F1、F2、F3、F4)、林地(W1、W2、W3、W4)、果园(O1、O2)、草地(M1、M2)、竹林(B1)等不同土地利用方式.表 1 中供试土壤各基本理化性质的变异系数范围为 18.4%~131.3%,变化范围较宽,说明各供试土壤性质差异较大,具有一定的代表性.

2.2 氮添加后不同土壤间 CO₂和 N₂O 排放速率的差异分析

图 2 所示的是代表土壤呼吸和 N₂O 排放低(W1)、中(F3)、高(O2)的 3 类典型土壤的 CO₂和 N₂O 排放速率随培养时间的动态变化情况.CO₂-CK 即 CO₂对照,为未添加氮源的土壤排放的 CO₂;CO₂-T 即 CO₂处理,为添加氮源的土壤排放的 CO₂;N₂O-CK 即 N₂O 对照,为未添加氮源的土壤排放的 N₂O;N₂O-T 即 N₂O 处理,为添加氮源的土壤排放的 N₂O.由图 2 可以看出,不同土壤的 CO₂和 N₂O 排放速率峰值时间不同,部分土壤培养初期即出现最大值,如 O2,部分土壤峰值出现时间推迟至培养的第 3 天,如 F3.所有土壤培养 15 d 之后,土壤 CO₂排放速率(以 C 计)和 N₂O 排放速率(以 N 计)在 T 和 CK 之间没有显著差异($P > 0.05$).

2.3 氮添加对不同土壤 CO₂和 N₂O 累积排放的影响

图 3 为不同土壤的 CO₂和 N₂O 累积排放量.由

表 1 供试土壤生物和理化特征

Table 1 Physical and bio-chemical properties of the tested soils

样品代码	土壤类型	利用方式(植被)	pH	质地(<0.01 mm 土粒)/%	SOC/(g·kg ⁻¹)	TN/(g·kg ⁻¹)	C/N	NH ₄ ⁺ -N/(mg·kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N/(mg·kg ⁻¹)
B1	棕红壤	竹园(毛竹)	5.25	55.1	12.58	0.92	13.60	14.6	0.6
F1	褐土	农田(甘薯)	8.58	63.6	4.69	0.49	9.50	3.5	3.2
F2	棕壤	农田(小麦)	5.54	57.5	8.81	1.28	6.90	8.3	17.2
F3	潮土	农田(蔬菜)	8.97	14.4	3.77	0.30	12.40	15.1	2.0
F4	黄棕壤	农田(水稻)	7.32	67.8	22.09	2.09	10.60	64.2	7.8
M1	草甸土	草地(杂草)	8.09	72.6	22.99	2.27	10.10	17.9	3.3
M2	滨海盐土	草地(杂草)	8.20	31.2	3.97	0.74	5.40	16.0	48.5
O1	潮土	果园(梨)	8.71	14.1	6.31	0.60	10.50	6.8	5.7
O2	潮土	果园(苹果)	8.44	26.0	8.20	0.82	10.00	12.3	18.5
W1	褐土	林地(松树)	8.29	54.3	4.59	0.48	9.50	4.2	9.4
W2	棕壤	林地(松树)	5.14	13.9	13.66	0.89	15.30	9.5	2.5
W3	黄棕壤	林地(松树)	7.03	60.2	18.17	1.54	11.80	16.5	6.4
W4	黄褐土	林地(槐树)	6.82	64.0	6.62	0.52	12.60	2.0	2.6
平均值			7.41	45.75	10.50	1.00	10.63	14.68	9.82
变异系数/%			18.40	48.70	65.10	62.90	24.80	107.70	131.30

样品代码	土壤类型	利用方式(植被)	MC/(mg·kg ⁻¹)	MN/(mg·kg ⁻¹)	MC/MN	BA/(lg(g ⁻¹))	AC/(lg(g ⁻¹))	FUN/(lg(g ⁻¹))
B1	棕红壤	竹园(毛竹)	184.55	21.30	8.67	5.28	4.92	4.48
F1	褐土	农田(甘薯)	95.57	8.12	11.77	5.19	5.38	3.44
F2	棕壤	农田(小麦)	42.71	12.41	3.44	5.82	5.60	4.54
F3	潮土	农田(蔬菜)	102.72	9.94	10.33	5.84	7.56	3.35
F4	黄棕壤	农田(水稻)	120.97	27.23	4.44	7.66	7.75	4.84
M1	草甸土	草地(杂草)	89.44	79.50	1.13	6.96	7.78	4.20
M2	滨海盐土	草地(杂草)	67.63	36.35	1.86	5.57	6.86	4.25
O1	潮土	果园(梨)	204.00	42.59	4.79	5.23	6.66	3.93
O2	潮土	果园(苹果)	417.07	97.36	4.28	8.09	6.62	4.08
W1	褐土	林地(松树)	80.78	6.46	12.50	5.05	5.77	3.82
W2	棕壤	林地(松树)	63.62	24.92	2.55	4.90	4.45	4.28
W3	黄棕壤	林地(松树)	363.28	82.51	4.40	7.05	7.68	4.02
W4	黄褐土	林地(槐树)	21.83	6.96	3.14	5.34	6.52	4.12
平均值			142.63	35.05	5.64	6.00	6.43	4.10
变异系数/%			85.10	90.20	68.00	17.80	17.50	10.10

图 3 可以看出,即使同种土地利用方式下的不同土壤类型的 CO₂和 N₂O 累积排放量(分别以 C、N 计)也各不相同. 无论是否添加氮源,均是土壤 O2 的 CO₂累积排放量最高,显著高于其他土壤(P<0.05),W1 的土壤呼吸累积排放量最低.未添加氮源即 CK 中,土壤 F4 的 N₂O 累积排放量最高,显著高于 O2 (P<0.05).而添加氮源后即 T 处理中土壤 O2 的 N₂O 累积排放量最高,显著高于其他土壤(P<0.05). 无论是否添加氮源,B1、F1、M2、O1、W1 和 W4 的 N₂O 排放均较低.

不同土壤 CO₂和 N₂O 排放对氮添加的响应不同.T 与 CK 处理之间,土壤 F1、W1 和 W3 的土壤呼吸无显著差异(P>0.05),土壤 F4、M2、W1 和 W2 的 N₂O 排放无显著差异(P>0.05);其他土壤无论是 CO₂还是 N₂O 排放,T 处理与 CK 间均有显著差异(P<0.05).为了解氮源添加对土壤 CO₂和 N₂O 排放的影响,进一步计算了不同土壤外源单位氮的 CO₂和 N₂O 排放因子:外源单位氮的 CO₂排放因子是指相对于 CK,每添加 1 g N 土壤多排放的 CO₂-C 量(% ,即 100×g(CO₂-C)·g(N)⁻¹),代码为 EF_{CO₂};外

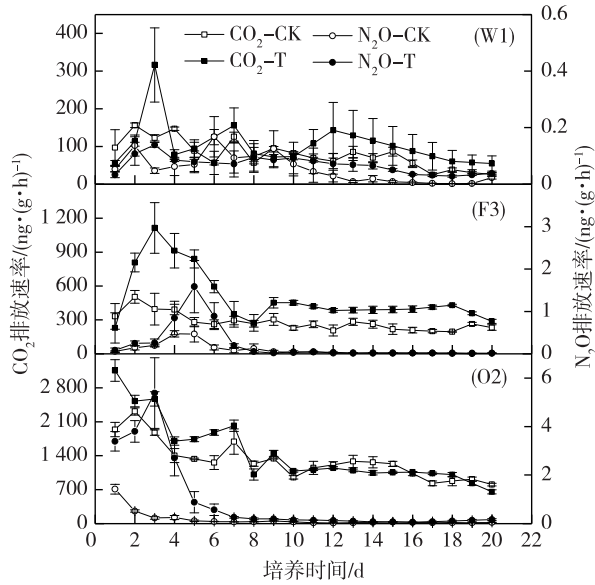


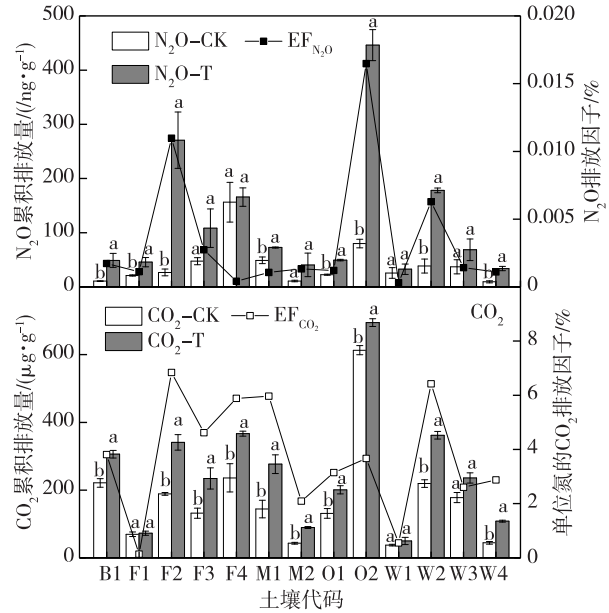
图2 典型土壤 W1、F3 和 O2 的 CO₂ 和 N₂O 排放速率的动态变化

Fig. 2 Variations in CO₂ and N₂O emission rates of typical soils (W1, F3 and O2) during incubation

源单位氮的 N₂O 排放因子是指添加的外源氮转化成 N₂O-N 的百分比(%),即 $100 \times g(N_2O-N) \cdot g(N)^{-1}$, 代码为 EF_{N₂O}。结果见图 3。外源氮的加入对不同土壤的呼吸速率刺激效果不同,对原本处在中等呼吸速率水平的土壤 F2 和 W2 的刺激效果最高,即外源单位氮的 CO₂ 排放因子 F2 和 W2 较大,而 F1 和 W1 最低;外源单位氮的 N₂O 转化率仅 F2 和 O2 较高,其他土壤均较低,尤其 W1 最低。

将增氮显著促进 CO₂ 和 N₂O 排放的土壤种类归为组 I,增氮未显著影响的土壤种类归为组 II。显著促进 CO₂ 排放的土壤即组 I 包括 B1、F2、F3、F4、M1、M2、O1、O2、W2、W4,组 II 包括土壤 F1、W1 和 W3;显著促进 N₂O 排放的土壤即组 I 包括 B1、F1、F2、F3、M1、O1、O2、W2、W4,组 II 包括土壤 F4、M2、W1 和 W3。计算组 I 和组 II 各指标平均值的比值,选取与数值 1 偏离度 25% 以上的因子作为两组土壤有较大差异的指标,具体结果见图 4 箭头所示处。从图 4 中可以归纳出:增氮显著促进 CO₂ 排放的土壤具有较低的黏粒成分、土壤微生物碳和微生物碳氮比,较高的土壤基础呼吸、土壤有效氮及细菌和真菌数量。增氮显著促进 N₂O 排放的土壤则具有较高的土壤基础呼吸,较低的内源 N₂O 排放和较低的土壤总氮、有效氮、放线菌和真菌数量。

为进一步反映组 I 和组 II 的特征,令增氮处理



注:同一土壤代码上不同小写字母表示对照和处理在 0.05 水平上差异显著。

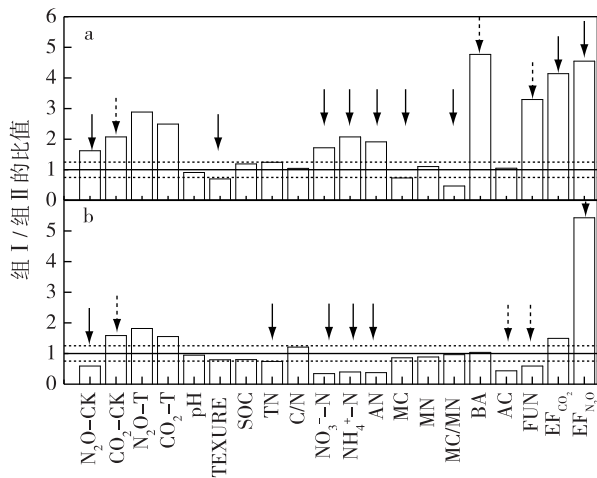
图3 不同土壤 CO₂ 和 N₂O 的累积排放量及单位氮的 CO₂ 和 N₂O 排放因子

Fig. 3 Cumulative emissions and emission factors per gram nitrogen for CO₂ and N₂O from different soils

T 和对照 CK 的 CO₂ 累积排放量的差值 $\Delta CO_2 = CO_2-T - CO_2-CK$, N₂O 累积排放量的差值 $\Delta N_2O = N_2O-T - N_2O-CK$, 将此计算结果以及典型的土壤性质对土壤组别作 BOX-PLOT 箱图(图 5)。从图 5 中可以看出,尽管不同土壤的生物和化学特性差异较大,呈非正态分布(中位线和均值点有偏离),但增氮显著促进 CO₂ 排放的土壤组(组 I)的真菌数量明显高于无显著影响组(组 II),而微生物碳氮比则明显小于组 II。增氮显著促进 N₂O 排放的土壤组(组 I)则是放线菌数量和硝态氮含量均明显小于无显著影响组(组 II)。

2.4 土壤呼吸和 N₂O 排放对氮添加响应的主要土壤驱动因子

表 2 所示为土壤呼吸和 N₂O 排放与土壤生化特性之间的相关性。由表 2 可以看出,未添加氮源条件下, N₂O 排放与铵态氮含量呈极显著正相关($P < 0.01$),与有机碳、全氮、有效氮、细菌、放线菌和真菌数量呈显著正相关($P < 0.05$),与其他因子无明显相关关系($P > 0.05$)。CK 的土壤呼吸即基础呼吸与细菌数量及微生物碳呈极显著正相关($P < 0.01$),与微生物氮呈显著正相关($P < 0.05$),与其他因子无明显



注:横坐标上的代码 AN 为有效氮,即铵态氮和硝态氮的和。

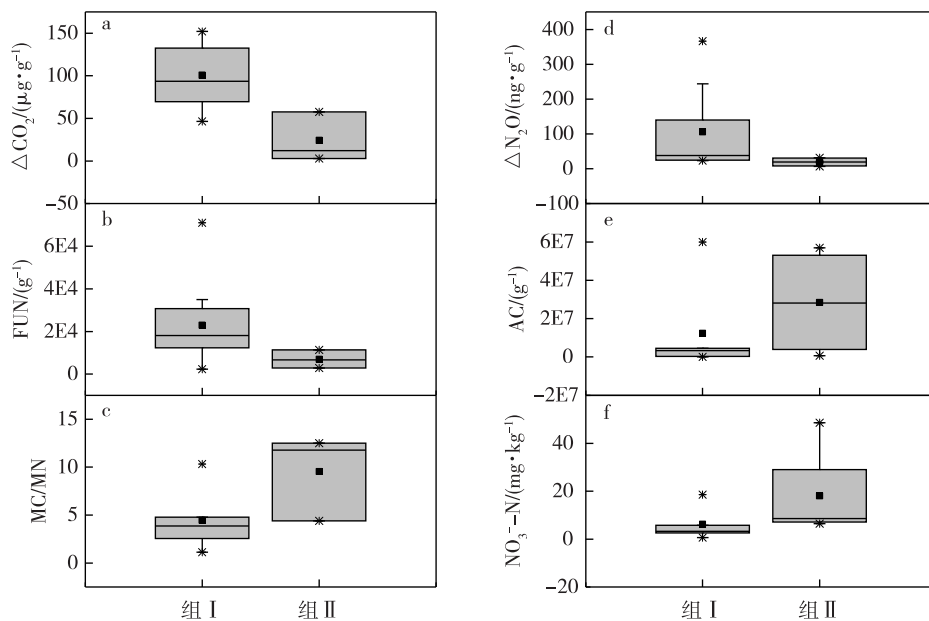
图4 增氮显著促进CO₂(a)和N₂O(b)排放的土壤组(组I)与未显著影响组(组II)各指标的比值

Fig. 4 Ratios of soil parameters of Group I (affected groups, in which nitrogen addition significantly promotes greenhouse gas emissions) to those of Group II (unaffected groups, in which nitrogen addition has little effect on soil greenhouse gas emissions), (a) for CO₂ and (b) for N₂O

相关关系($P>0.05$).在添加氮源条件下,即T的土壤的N₂O排放与基础土壤呼吸和细菌数量呈极显著正相关($P<0.01$),与其他因子无明显相关关系($P>$

0.05).T的土壤呼吸与基础土壤呼吸和细菌数量呈极显著正相关($P<0.01$),与微生物碳、氮呈显著正相关($P<0.05$),与其他因子无明显相关关系($P>0.05$).此外,添加氮源后即T组N₂O排放和土壤呼吸具有极显著正相关关系($P<0.01$),而CK组未见二者有显著相关关系($P>0.05$).外源单位氮的CO₂排放因子与有机碳、全氮、真菌数量呈显著正相关($P<0.05$),与MC/MN呈显著负相关($P<0.05$),与其他因子无明显相关关系($P>0.05$).外源单位氮的N₂O转化率与基础土壤呼吸和细菌数量呈极显著正相关($P<0.01$),与其他指标无明显相关关系($P>0.05$).

进一步将土壤CO₂和N₂O累积排放量与土壤因子之间的关系进行逐步回归分析,回归方程见表3.结果表明,在本研究0.30g·g⁻¹的水分条件下,无论是否添加氮源,土壤呼吸均主要由土壤细菌数量和pH来决定,且与细菌数量成正比,与pH呈反比.未添加氮源处理的土壤N₂O排放主要是由土壤细菌和铵态氮含量决定,添加氮源条件下,土壤N₂O排放主要是由土壤细菌数量决定,且与之成正比.外源单位氮的CO₂排放因子主要取决于MC/MN,与之成反比,外源单位氮的N₂O转化率主要取决于土壤细菌数量,与之成正比.



注:a-c分别反映组I和组II之间的ΔCO₂、真菌和微生物碳氮比的差异;d-f分别反映组I和组II之间ΔN₂O、放线菌和硝态氮的差异;箱顶和箱底分别为上下四分位数,■表示均值,*表示的是1%~99%范围。

图5 典型指标对应土壤组别的箱形图

Fig. 5 Boxplots of soil properties versus the soil groups

表 2 土壤 CO₂、N₂O 累积排放量、单位氮的 CO₂ 和 N₂O 排放因子与土壤生化因子的相关系数 (n=13)

Table 2 Pearson correlation coefficients of cumulative CO₂ and N₂O emissions, CO₂ and N₂O emissions factors per gram nitrogen against soil biochemical parameters (n=13)

指标	N ₂ O-CK	CO ₂ -CK	N ₂ O-T	CO ₂ -T	EF _{CO₂}	EF _{N₂O}
N ₂ O-CK	1.000				0.419	0.151
CO ₂ -CK	0.490	1.000			0.344	0.812**
N ₂ O-T	0.464	0.888**	1.000		0.458	0.946**
CO ₂ -T	0.542	0.965**	0.900**	1.000	0.577*	0.805**
土壤 pH	0.120	-0.080	-0.114	-0.210	-0.505	-0.171
质地	0.123	-0.244	-0.252	-0.234	-0.079	-0.326
SOC	0.562*	0.229	0.075	0.354	0.557*	-0.122
TN	0.569*	0.190	0.137	0.322	0.565*	-0.056
C/N	0.045	0.140	-0.086	0.182	0.216	-0.112
NO ₃ ⁻ -N	-0.084	0.014	0.161	-0.029	-0.148	0.210
NH ₄ ⁺ -N	0.880**	0.211	0.143	0.297	0.408	-0.163
AN	0.618*	0.170	0.209	0.208	0.218	0.007
MC	0.239	0.718**	0.446	0.586*	-0.140	0.410
MN	0.264	0.620*	0.413	0.576*	0.133	0.364
MC/MN	-0.145	-0.216	-0.265	-0.347	-0.575*	-0.243
BA	0.604*	0.902**	0.811**	0.815**	0.110	0.684**
AC	0.595*	0.013	-0.088	0.108	0.348	-0.316
FUN	0.681*	0.192	0.222	0.322	0.558*	-0.002

注: *表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; **表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关.

表 3 逐步回归分析结果

Table 3 Results of the multiple regressions

回归方程	R ²	P	n
$F_{N_2O-CK} = 4.09 \times 10^{-7} \times BA + 1.93 \times NH_4^+-N + 6.60$	0.879	0.000	01 13
$F_{CO_2-CK} = 4.02 \times 10^{-6} \times BA - 31.93 \times pH + 349.38$	0.871	0.000	01 13
$F_{N_2O-T} = 2.74 \times 10^{-6} \times BA + 78.75$	0.627	0.001	13
$F_{CO_2-T} = 4.32 \times 10^{-6} \times BA - 51.23 \times pH + 570.98$	0.784	0.000	2 13
$F_{EF_{CO_2}} = -0.32 \times MC/MN + 5.56$	0.271	0.04	13
$F_{EF_{N_2O}} = 9.32 \times 10^{-11} \times BA + 0.0021$	0.419	0.01	13

3 讨论

本研究发现氮添加显著促进 CO₂ 排放的土壤具有较低的黏粒成分、土壤微生物碳和微生物碳氮比,较高的土壤基础呼吸、土壤有效氮及细菌和真菌数量(图 4),反映在低 MC/MN 和高真菌数量上(图 5),特别突出.早期研究表明在氮饱和的森林土壤中,氮增加减少了土壤呼吸,在氮限制的土壤中,氮增加对土壤呼吸没有显著影响^[8-10].最近的研究则表明氮增加对土壤呼吸的抑制作用主要发生在 N 缺乏的土壤^[26].也有研究发现增氮能增加土壤呼吸^[27-28].

本研究结果亦是如此,原因在于微生物在分解利用碳氮源时是基于一定的微生物碳氮比进行的,氮对土壤呼吸的影响最终取决于土壤的碳氮比是否适合微生物活动,如果增氮后土壤依旧处于适合微生物的碳氮比,则可能促进土壤呼吸,反之则抑制土壤呼吸.本研究发现外源单位氮的 CO₂ 排放因子主要取决于 MC/MN,且与 MC/MN 呈显著负相关($P < 0.05$),则直接证实了这一点.

无论是否添加氮源,本研究中土壤呼吸均与细菌数量及微生物碳氮呈显著正相关(表 2).逐步回归分析则表明土壤细菌和 pH 均为土壤呼吸的决定因子,且土壤呼吸与 pH 为负相关关系(表 3).对不同利用方式下草地土壤微生物及土壤呼吸特性的既有研究发现,土壤呼吸速率与微生物碳成正相关^[29].另有学者对洞庭湖滩地土壤微生物与土壤呼吸特征进行了分析,发现土壤呼吸速率变化与土壤细菌数量变化呈显著相关^[30].最新的研究结果表明氮增加对土壤碳动力学的影响机理在于氮诱导酸化导致对 pH 敏感的微生物及地球化学性质的改变,进而改变碳的矿化与固持^[31],也间接证明土壤呼吸与 pH 的紧密相关性.此外外源单位氮的 CO₂ 排放因子与有机碳、全氮、真菌数量呈显著正相关($P < 0.05$),与 MC/MN 呈显著负相关($P < 0.05$;表 2).这说明土壤呼吸最终是由碳基质及土壤微生物决定,且细菌和真菌为主要贡献者.

此外,本研究还发现增氮显著促进 N₂O 排放的土壤具有较高的土壤基础呼吸,较低的内源 N₂O 排放和较低的土壤总氮、有效氮、放线菌和真菌数量(图 4).尤其是硝态氮和放线菌数量均显著小于增氮未显著影响 N₂O 排放的土壤组(图 5).在氮饱和的土壤中,氮添加增加了土壤 N₂O 的排放^[9,12].在氮限制的松树土壤中,高氮也增加了土壤 N₂O 的排放^[8-10].在温带森林生长季,长期氮沉降降低了 72.8%~85.7% 的 N₂O 排放通量,而在冻融期增加了 11.2~17.8 倍 N₂O 排放,这与植物对氮的利用及土壤微生物活性有关^[13].但也有研究认为氮沉降无论是对农业土壤还是森林土壤均增加了 N₂O 的排放^[15].本研究是纯土壤培养,不存在植物对氮的争夺利用情况,故 N₂O 的排放主要取决于土壤碳氮源和微生物活性.

未添加氮源条件下,即 CK 的 N₂O 排放与铵态氮含量、有机碳、全氮、有效氮、细菌、放线菌和真菌数量呈显著正相关($P < 0.05$).添加氮源条件下,即 T

的土壤 N_2O 排放与土壤基础呼吸和细菌数量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与其他因子无明显相关关系 ($P > 0.05$, 表 2). 半干旱草地土壤真菌硝化反硝化和细菌自养硝化主导 N 素转化过程, 是 N_2O 产生的主要途径^[32]. 文献[33]等相关研究结果表明米褚天然林土壤在给定实验条件下真菌活性比细菌的大, 但二者对土壤 N_2O 产生的贡献几乎相等. 本研究也表明放线菌和真菌与 N_2O 的产生有关, 但细菌对增氮的响应更明显. 逐步回归分析表明未添加氮源处理的土壤 N_2O 排放主要驱动因子是土壤细菌和铵态氮, 而添加氮源条件下, 主要驱动因子仅是土壤细菌. 外源单位氮的 N_2O 转化率也主要取决于土壤细菌数量. 本研究土壤的含水量为 $0.30 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$, 土壤处于充氧条件, 可能硝化作用占主导地位, 铵态氮是硝化反应的底物. 在不添加外加氮源的情况下, 如果土壤的有效氮含量比较低, 那么有效氮含量就会成为限制 N_2O 排放的主要影响因子, 而其他土壤因素对 N_2O 排放的影响就很难表现出来^[34]. 本研究结果也说明在没有添加外源氮的情况下, 土壤较低的有效氮含量会成为主要限制因子, 但当添加外源氮后, 底物充足后 N_2O 排放仅取决于微生物的数量.

土壤内源 N_2O 排放和土壤基础呼吸无显著相关关系, 但添加外源氮后, N_2O 排放和土壤呼吸具有极显著正相关关系 ($P < 0.01$). 这可能是增氮促进了硝化反硝化微生物的活性, 此部分微生物的呼吸在土壤总呼吸中占了较高的比重, 故 N_2O 排放和土壤呼吸具有极显著正相关关系^[35-36].

总之, 土壤生化特性尤其是微生物碳氮比、土壤 pH 及微生物活性在土壤呼吸和 N_2O 排放对氮添加响应方面起了决定性作用.

4 结论

1) 氮添加显著促进 CO_2 排放的土壤具有较低的黏粒成分、土壤微生物碳和微生物碳氮比, 较高的土壤基础呼吸、土壤有效氮及细菌和真菌数量等特点. 无论是否添加氮源, 土壤呼吸均主要取决于土壤细菌数量和 pH 值, 与细菌数量呈正相关, 与 pH 呈负相关. 外源单位氮的 CO_2 排放量与土壤有机碳、全氮、真菌数量呈显著正相关, 与 MC/MN 呈显著负相关; 外源单位氮的 CO_2 排放量主要取决于 MC/MN.

2) 增氮显著促进 N_2O 排放的土壤具有较高的土壤基础呼吸, 较低的内源 N_2O 排放和较低的土壤总氮、有效氮、放线菌和真菌数量等性质. 在不添加

氮源条件下, N_2O 排放主要取决于土壤细菌数量和铵态氮含量. 添加氮源后土壤 N_2O 排放主要取决于土壤细菌数量; 外源单位氮的 N_2O 转化率主要取决于土壤细菌数量, 与之呈极显著正相关.

3) 土壤内源 N_2O 排放和土壤基础呼吸无显著相关关系, 添加外源氮后, N_2O 排放和土壤呼吸具有极显著正相关关系.

参考文献

References

- [1] Liu X J, Duan L, Mo J M, et al. Nitrogen deposition and its ecological impact in China: an overview [J]. Environmental Pollution, 2011, 159(10): 2251-2264
- [2] Kanakidou M, Myriokefalitakis S, Daskalakis N, et al. Past, present and future atmospheric nitrogen deposition [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2016, 73(5): 2039-2047
- [3] Lu C Q, Tian H Q. Half-century nitrogen deposition increase across China: a gridded time-series data set for regional environmental assessments [J]. Atmospheric Environment, 2014, 97: 68-74
- [4] Liu X J, Zhang Y, Han W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China [J]. Nature, 2013, 494(7438): 459-462
- [5] Zhu J X, He N P, Wang Q F, et al. The composition, spatial patterns, and influencing factors of atmospheric wet nitrogen deposition in Chinese terrestrial ecosystems [J]. Science of the Total Environment, 2015, 511: 777-785
- [6] Zhao Y H, Zhang L, Chen Y F, et al. Atmospheric nitrogen deposition to China: a model analysis on nitrogen budget and critical load exceedance [J]. Atmospheric Environment, 2017, 153: 32-40
- [7] Xu W, Zhao Y H, Liu X J, et al. Atmospheric nitrogen deposition in the Yangtze River basin: spatial pattern and source attribution [J]. Environmental Pollution, 2018, 232: 546-555
- [8] Mo J M, Zhang W, Zhu W X, et al. Response of soil respiration to simulated N deposition in a disturbed and a rehabilitated tropical forest in Southern China [J]. Plant and Soil, 2007, 296(1/2): 125-135
- [9] Zhang W, Mo J M, Yu G R, et al. Emissions of nitrous oxide from three tropical forests in Southern China in response to simulated nitrogen deposition [J]. Plant and Soil, 2008, 306(1/2): 221-236
- [10] Zhang W, Mo J M, Zhou G Y, et al. Methane uptake responses to nitrogen deposition in three tropical forests in Southern China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, 113(D11): D11116
- [11] Song C C, Wang L L, Tian H Q, et al. Effect of continued nitrogen enrichment on greenhouse gas emissions from a wetland ecosystem in the Sanjiang Plain, Northeast China: a 5 year nitrogen addition experiment [J]. Journal

- of Geophysical Research; Biogeosciences, 2013, 118(2): 741-751
- [12] Mo J M, Zhang W, Zhu W X, et al. Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in Southern China [J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(2): 403-412
- [13] Tian P, Zhang J B, Cai Z C, et al. Different response of CO₂ and N₂O fluxes to N deposition with seasons in a temperate forest in northeastern China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(5): 1821-1831
- [14] Jiang C M, Yu G R, Fang H J, et al. Short-term effect of increasing nitrogen deposition on CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(24): 2920-2926
- [15] Sun L Y, Li L, Chen Z Z, et al. Combined effects of nitrogen deposition and biochar application on emissions of N₂O, CO₂ and NH₃ from agricultural and forest soils [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, 60(2): 254-265
- [16] Song L, Tian P, Zhang J B, et al. Effects of three years of simulated nitrogen deposition on soil nitrogen dynamics and greenhouse gas emissions in a Korean pine plantation of northeast China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 1303-1311
- [17] 陈玲, 范会, 蒋静艳. 不同生态系统土壤生化特征及其与土壤呼吸和 N₂O 排放的关系 [J]. *环境科学*, 2014, 35(8): 3102-3109
CHEN Ling, FAN Hui, JIANG Jingyan. Soil biochemical characteristics in different ecological systems and their relationships with soil respiration and N₂O emission [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(8): 3102-3109
- [18] Pilegaard K, Skiba U, Ambus P, et al. Factors controlling regional differences in forest soil emission of nitrogen oxides (NO and N₂O) [J]. *Biogeosciences*, 2006, 3(4): 651-661
- [19] Lark R M, Milne A E, Addiscott T M, et al. Scale- and location-dependent correlation of nitrous oxide emissions with soil properties; an analysis using wavelets [J]. *European Journal of Soil Science*, 2004, 55(3): 611-627
- [20] Gödde M, Conrad R. Influence of soil properties on the turnover of nitric oxide and nitrous oxide by nitrification and denitrification at constant temperature and moisture [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 32(2): 120-128
- [21] La Scala N Jr, Marques J Jr, Pereira G T, et al. Carbon dioxide emission related to chemical properties of a tropical bare soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(10): 1469-1473
- [22] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH₄, CO₂ and N₂O emissions from a short-plant ecosystem [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20(5): 842-844
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [24] 李阜棣. 农业微生物学实验技术 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1996
- [25] 石鹤. 微生物学实验 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010
- [26] Poeplau C, Herrmann A M, Kätterer T. Opposing effects of nitrogen and phosphorus on soil microbial metabolism and the implications for soil carbon storage [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 100: 83-91
- [27] Jassal R S, Black T A, Trofymow J A, et al. Soil CO₂ and N₂O flux dynamics in a nitrogen-fertilized Pacific Northwest Douglas-fir stand [J]. *Geoderma*, 2010, 157(3/4): 118-125
- [28] Tu L H, Hu T X, Zhang J, et al. Nitrogen addition stimulates different components of soil respiration in a subtropical bamboo ecosystem [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 58: 255-264
- [29] 郭明英, 朝克图, 尤金成, 等. 不同利用方式下草地土壤微生物及土壤呼吸特性 [J]. *草地学报*, 2012, 20(1): 42-48
GUO Mingying, ZHAO Ketu, YOU Jincheng, et al. Soil microbial characteristic and soil respiration in grassland under different use patterns [J]. *Acta Agreotir Sinica*, 2012, 20(1): 42-48
- [30] 唐洁, 李志辉, 汤玉喜, 等. 洞庭湖滩地土壤微生物与土壤呼吸特征分析 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2011, 31(4): 20-24
TANG Jie, LI Zhihui, TANG Yuxi, et al. Characteristics analyses of soil respiration and microorganisms in beach of Dongting Lake [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2011, 31(4): 20-24
- [31] Ye C L, Chen D M, Hall S J, et al. Reconciling multiple impacts of nitrogen enrichment on soil carbon: plant, microbial and geochemical controls [J]. *Ecology Letters*, 2018, 21(8): 1162-1173
- [32] Crenshaw C L, Lauber C, Sinsabaugh R L, et al. Fungal control of nitrous oxide production in semiarid grassland [J]. *Biogeochemistry*, 2008, 87(1): 17-27
- [33] 章伟, 高人, 陈仕东, 等. 米槠天然林土壤真菌对 N₂O 产生的贡献 [J]. *亚热带资源与环境学报*, 2013, 8(2): 28-34
ZHANG Wei, GAO Ren, CHEN Shidong, et al. Fungal contribution to N₂O production in soil for a natural *Castanopsis carlesii* forest in Wuyi nature reserve, southeastern China [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2013, 8(2): 28-34
- [34] Conen F, Dobbie K E, Smith K A. Predicting N₂O emissions from agricultural land through related soil parameters [J]. *Global Change Biology*, 2000, 6(4): 417-426
- [35] Xu X F, Tian H Q, Hui D F. Convergence in the relationship of CO₂ and N₂O exchanges between soil and atmosphere within terrestrial ecosystems [J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(7): 1651-1660
- [36] Chen G C, Tam N F Y, Ye Y. Spatial and seasonal variations of atmospheric N₂O and CO₂ fluxes from a subtropical mangrove swamp and their relationships with soil characteristics [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 48: 175-181

Effect of soil biochemical properties on soil respiration and N₂O emission under simulated nitrogen deposition

ZHANG Ting¹ ZHOU Jinrong¹ FENG Lianjie¹ CHEN Ling¹ JIANG Jingyan¹

¹ College of Resource and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095

Abstract Soil respiration and nitrous oxide (N₂O) emission have attracted great concern for their contribution to global warming. The biological processes particularly microbial processes play a dominant role in soil respiration and N₂O emission processes. Southeast China is a region with high nitrogen deposition. The effect of nitrogen deposition on carbon and nitrogen cycling varies enormously in different soils. The purpose of this study was to determine soil biochemical factors which hold key roles in soil respiration and N₂O emission under simulated nitrogen deposition. Thirteen types of soil from different land use systems in Jiangsu province were collected and their biochemical characteristics were analyzed, then an indoor soil incubation experiment with ammonium nitrate (NH₄NO₃) input was carried out at constant soil temperature (25 °C) and soil moisture (0.30 g·g⁻¹, simulated upland). The results showed that, when nitrogen addition significantly promoted CO₂ emission, the soils had the properties of low clay composition, low ratio of soil microbial carbon to nitrogen (MC/MN), high soil basic respiration, high soil available nitrogen value, and high abundances of bacterial and fungal. When nitrogen addition significantly promoted N₂O emission, the soils had the properties of high basic respiration, low endogenous N₂O emissions, low total nitrogen content as well as available nitrogen value, and low abundances of actinomycetes and fungi. Stepwise regression analysis suggested that soil respiration could be quantitatively determined by a linear combination of the abundance of soil bacteria and pH value. At the absence of the exogenous nitrogen, N₂O emission was mainly dependent on the values of soil bacteria and ammonium nitrogen. When the exogenous nitrogen was added, N₂O emission was only dependent on the value of soil bacteria. No significant correlation was found between endogenous N₂O emission and soil basic respiration ($P > 0.05$), but there was a significantly positive correlation between N₂O emission and soil respiration ($P < 0.01$) after exogenous nitrogen addition. Moreover, the CO₂ emission per gram exogenous nitrogen was positively correlated with soil organic carbon, total nitrogen contents and the abundance of soil fungi ($P < 0.05$), and negatively correlated with the ratio of MC/MN ($P < 0.05$), while the N₂O emission factor was significantly positively correlated with the abundance of soil bacteria ($P < 0.01$). Stepwise regression analysis showed that the CO₂ emission per gram nitrogen could be quantitatively determined by the ratio of MC/MN, and the N₂O emission factor was mainly dependent on the abundance of soil bacteria. In conclusion, the ratio of MC/MN and soil bacterial value were the determinants of soil respiration and N₂O emissions under simulated nitrogen deposition, respectively.

Key words soil properties; soil microorganism; soil respiration; N₂O emission; nitrogen addition