

模拟酸雨对南亚热带典型森林土壤 N₂O 排放的影响

曹亚玲^{1,2} 俞梦笑¹ 江军¹ 曹楠楠^{1,2} 赵梦頔^{1,2} 王琛¹ 张德强¹ 闫俊华^{1*}

(¹中国科学院华南植物园, 退化生态系统植被恢复与管理重点实验室, 广州 510650; ²中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 基于长期模拟酸雨森林样地, 利用箱式法同步测定了不同酸雨强度处理下森林土壤 N₂O 排放通量, 研究了模拟酸雨对我国南亚热带针阔叶混交林和季风常绿阔叶林两种代表性森林土壤 N₂O 排放的影响。结果表明: 连续5年(2014—2018年)观测周期内, 两种林型土壤 N₂O 排放通量在各模拟酸雨处理下均表现出明显的季节变化特征, 湿季排放通量高于干季, 并且年际变化较大。受2017—2018年度降水减少的影响, 此期间两种林型土壤 N₂O 排放通量普遍较低。两种林型土壤 N₂O 排放通量与土壤温度和土壤湿度呈显著正相关。季风常绿阔叶林对照样方土壤 N₂O 排放通量为 12.6 μg N₂O m⁻² · h⁻¹, 与对照相比, pH 3.5 和 pH 3.0 条件下土壤 N₂O 排放通量分别上升 42.9% 和 61.1%, 模拟酸雨显著增加了季风常绿阔叶林土壤 N₂O 排放通量; 模拟酸雨同样有促进针阔叶混交林土壤 N₂O 排放的趋势, 但各处理间差异不显著。在酸雨依旧严峻的形势下, 我国南亚热带典型森林土壤 N₂O 排放通量将增加, 且不同林型的增幅不同。

关键词 土壤 N₂O 排放; 模拟酸雨; 南亚热带森林

Effects of simulated acid rain on soil N₂O emission from typical forest in subtropical southern China. CAO Ya-ling^{1,2}, YU Meng-xiao¹, JIANG Jun¹, CAO Nan-nan^{1,2}, ZHAO Meng-di^{1,2}, WANG Chen¹, ZHANG De-qiang¹, YAN Jun-hua^{1*} (¹Key Laboratory of Vegetation Restoration and Management of Degraded Ecosystems, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China).

Abstract: Based on a long-term simulated acid rain experiment, soil N₂O emission fluxes were measured using static chambers and the gas chromatography method in a coniferous and broadleaved mixed forest and a monsoon evergreen broadleaved forest in southern China. During the five-year observation periods (2014–2018), soil N₂O emission fluxes in the two forests showed obvious seasonal variation. The soil N₂O emission fluxes in wet season were significantly higher than that in dry season, with a large annual variation. Due to the decreases of precipitation, soil N₂O emission fluxes of the two forests in 2017 and 2018 were generally low. Soil N₂O emission flux was positively correlated with soil temperature and soil moisture. In the monsoon evergreen broadleaved forest, soil N₂O emission flux in the control plot was 12.6 μg N₂O · m⁻² · h⁻¹. Soil N₂O emission fluxes under the pH 3.5 and pH 3.0 treatments increased by 42.9% and 61.1%, respectively. Soil N₂O emission was significantly increased under simulated acid rain in the monsoon evergreen broadleaved forest. Acid rain promoted soil N₂O emission in the coniferous and broadleaved mixed forest, but without significant difference among the treatments. Under the scenario of increasing acid rain, soil N₂O emission fluxes in typical subtropical southern China forests would increase, and the magnitude of such increase was different among forest types.

Key words: soil N₂O emission; simulated acid rain; subtropical southern China forest.

本文由中国科学院战略性先导科技专项(XDA13010302)、国家杰出青年科学基金项目(41825020)、国家自然科学基金项目(31901296)和中国博士后科学基金项目(2020M672863)资助 This work was supported by the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDA13010302), the National Science Fund for Distinguished Young Scholars (41825020), the National Natural Science Foundation of China (31901296), and the China Postdoctoral Science Foundation (2020M672863).

2020-10-02 Received, 2021-01-27 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jhyan@scib.ac.cn

全球变暖是当今人类面临的重大环境问题之一,大气中温室气体浓度的不断升高是导致这一问题产生的主要原因。氧化亚氮(N_2O)作为一种重要的温室气体,虽然浓度较二氧化碳(CO_2)低,但在百年时间尺度上,单分子 N_2O 的温室效应潜能是 CO_2 的298倍^[1],对大气温室效应贡献率达6%;另外, N_2O 极易与臭氧结合,破坏大气中的臭氧层,进一步使地表升温^[2]。工业革命以来,大气中的 N_2O 浓度以每年0.25%的速度快速增长,目前已达到322 ppb^[3],因此人们在关注全球变化时更应该重视有关 N_2O 源、汇功能及其影响因素的研究。一般情况下,通气性较好的森林土壤是 N_2O 的源^[4]。森林作为我国重要的生态系统类型,根据第九次全国森林资源清查(2014—2018年)结果,全国森林面积为2.2亿 hm^2 ,森林覆盖率达到23.0%^[5],是巨大的 N_2O 排放源。监测森林土壤 N_2O 排放的变化对国家和区域制定减缓全球变暖的政策具有指导意义。

在未被污染的大气中,大气降水的pH值为5.6,但人类活动导致大气中酸性物质含量的增加改变了原有大气化学组成,从而使得大气降水的pH值发生变化。国际上通常把pH<5.6的降水判定为酸雨^[6]。酸雨污染已经从区域性环境问题发展成全球性环境问题,其对生态环境有重要影响。酸雨所携带的酸性物质进入生态系统中,将引起一系列的生态反应,如土壤酸化、森林生态系统结构和功能的转变^[7]、生物多样性的降低^[8]、养分离子的流失与耗竭^[9]、铝毒等^[10]。酸雨可通过影响土壤理化性质和土壤微生物属性来改变土壤 N_2O 排放速率。目前,国际上有关酸雨与 N_2O 排放关系的研究多见于欧美一些温带地区^[11-13],对于热带和亚热带森林报道较少。我国亚热带森林地处南方酸性红壤区域,在近40年经济快速发展的过程中,大气氮、硫氧化物排放量剧增,高强度和持续性酸雨(硫>33 $kg S \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,氮>48 $kg N \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)^[14-15]导致该地区原有的酸性红壤进一步酸化,许多森林土壤的pH值降至4以下,老龄林土壤的pH值通常小于3.8^[14]。在如此深度酸化的土壤里,土壤微生物群落^[16]、土壤养分状况、理化性质^[17]发生改变的情况下,土壤 N_2O 通量对酸雨的响应状况还未可知。

为此,本研究基于我国鼎湖山野外长期模拟酸雨试验平台,选择亚热带典型的森林即针阔叶混交林和季风常绿阔叶林为对象,探讨亚热带已经深度酸化的森林土壤 N_2O 排放通量对模拟酸雨的响应,为进一步了解未来酸雨对森林生态系统结构

与功能的影响及机理提供科学参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究样地位于广东省鼎湖山自然保护区(23°09'21"—23°11'30" N,112°30'39"—112°33'41" E),保护区面积约1100 hm^2 ,为典型的南亚热带季风气候,水热条件丰富。该区年均温21.4℃,最热月7月和最冷月1月的均温分别为28.1和12.5℃。该区域干湿季分明,4—9月为湿季,10月—翌年3月为干季,年降水量1956 mm(其中约80%的降水集中在湿季),年蒸发量1115 mm,年均相对湿度为80%^[18]。土壤成土母岩为砂岩和砂页岩,土壤类型为红壤^[18]。本研究选择该地区针阔叶混交林和季风常绿阔叶林两种主要森林类型进行研究。

针阔叶混交林在海拔200 m左右,约占保护区面积的50%。该森林为1930年人工种植的马尾松(*Pinus massoniana*)被一些阔叶树种入侵而形成的针叶、阔叶混交林。该森林类型群落结构相对阔叶林要简单一些,乔木层分布优势树种主要有马尾松和木荷(*Schima superba*),林下植被灌木层有三桠苦(*Evodia lepta*)、变叶榕(*Ficus variolosa*)、豺皮樟(*Litsea rotundiflora*)等,草本层以芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)和黑莎草(*Gahnia tristis*)为主。该森林乔木层的树高范围是4~12 m,胸径范围为4~48 cm^[19]。

季风常绿阔叶林分布在海拔250~300 m,约占保护区面积的20%,为成熟林,具有热带向亚热带过渡的特征,有着近400年的保护历史^[19]。整个群落处于由阳性植物占优势的森林向中生性和耐阴性植物占优势的演替顶极群落类型演变。群落终年常绿,垂直结构复杂,物种组成丰富。地上部分乔木层占优势,可分为3层,优势树种主要有锥栗(*Castanea henryi*)、木荷、厚壳桂(*Cryptocarya chinensis*)、华润楠(*Machilus chinensis*)、云南银柴(*Aporosa yunnanensis*)、红枝蒲桃(*Syzygium rehderianum*)等。乔木层林下分布着灌木层和草本层,其中灌木层多为乔木幼树,优势植物主要有柏拉木(*Blastus cochinchinensis*)、罗伞树(*Ardisia quinquegona*)、香楠(*Aidia canthioides*)等。草本层优势植物主要有山姜(*Alpinia japonica*)、双盖蕨(*Diplazium donianum*)等。另外,还分布一些附生植物和藤本植物,如买麻藤(*Gnetum montanum*)、杖藤(*Calamus rhabdocladus*)等。该森林乔木层的树高平均为24 m,胸径范围为

5~163 cm^[19]。

1.2 试验设计

2009 年初在针阔叶混交林和季风常绿阔叶林样地选取坡度和坡向接近的区域,每个森林随机设置 12 个 10 m×10 m 的样方,每个样方的四周用水泥板围起,水泥板插入地下部分 20 cm,地上部分高出地表 5 cm,为了避免样方之间土壤和植物根系的相互干扰,每个样方之间设置 3 m 宽的缓冲带。根据近年来鼎湖山酸雨的酸度及主要成分的变化趋势,以 H₂SO₄:HNO₃=1:1(摩尔比)的溶液作为模拟酸雨的试验材料,设置 4 个梯度,分别为对照(CK: pH 4.5 的天然湖水)、pH 4.0、pH 3.5 以及 pH 3.0,每处理 3 个重复。2009 年 6 月开始,每隔两周的时间,将配置好的 60 L 模拟酸雨溶液采用汽油动力喷雾机均匀地喷洒在对应样方中,对对照样方则喷洒等量的湖水,以避免不同处理间因外加的水而造成生物地球化学循环的差异。在模拟酸雨喷淋期间,pH 4.0、pH 3.5 和 pH 3.0 样方接受的 H⁺输入量分别为 14.4、48 和 144 mol·hm⁻²·a⁻¹^[16]。于 2014 年 6 月在每个样方中随机布置一个直径为 30 cm 的 PVC 环,将 PVC 环插入地下约 5 cm,夯实 PVC 环以防止漏气,并保持 PVC 环在整个酸雨试验期间位置不变。

1.3 样品采集

土壤 N₂O 通量测定采用静态箱气相色谱法。采样工作于 PVC 环安置好后 3 个月开始,以减少土壤扰动对结果的影响。试验时间为 2014 年 10 月—2018 年 8 月,气体样品每月采集一次,时间为采样日的 18:00、22:00、2:00、6:00、10:00、14:00,在盖上底箱后的 0、15、30 和 45 min 用 100 mL 的医用针筒分别采集气体一次,采样后 24 h 内带回实验室分析。N₂O 浓度用气相色谱(Agilent 7890, NYSE: A., Palo Alto, California, USA)分析,采集气体的同时分别用便携式数字温度计(TES-1310, Ltd., China)和土壤湿度计(ProCheck, Decagon Devices, Inc., Washington, USA)测定 5 cm 深处土壤温度和土壤湿度,用气压计(Model Thommen, Switzerland)测定取样点的大气压强。土壤 N₂O 通量的计算参考 Yan 等^[20]的计算方法。正值表示气体从土壤排放到大气,负值表示土壤吸收大气中该气体。

于 2016 年 6 月分别在针阔叶混交林和季风常绿阔叶林的模拟酸雨试验样地进行 1 次土壤样品采集工作,去除土壤表层覆盖的凋落物,用内径 2.5 cm 的不锈钢土钻采集 0~10 cm 的混合土壤样品,每处

理 5 个重复。取样完成后将土样带回实验室,挑出土壤样品中肉眼可见的动植物残体、根系和石头,过 2 mm 筛后自然风干,土壤 pH 测定采用水浸提电位法,将 10 g 土壤与 25 mL 去离子水充分震荡混合后,静置沉淀 30 min,用 pH 计测定。

1.4 数据处理

土壤微生物生物量碳和土壤有机碳数据分别引自梁国华等^[21]和张慧玲等^[22]在鼎湖山模拟酸雨平台的研究。所有数据均利用 SPSS 22.0 软件进行分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)检验土壤温度、湿度、土壤 pH 值以及土壤 N₂O 通量在不同模拟酸雨处理之间的差异。用回归分析来拟合土壤温度和湿度与土壤 N₂O 通量之间的相关关系($\alpha=0.05$)。所有作图用 SigmaPlot 14.0 完成。表中数据为平均值±标准误。

2 结果与分析

2.1 模拟酸雨处理下土壤理化性质的变化

在针阔叶混交林中,模拟酸雨并未显著改变土壤 pH、土壤温度、土壤微生物生物量碳和土壤总有机碳含量。在季风常绿阔叶林中,模拟酸雨并未显著改变土壤温度和土壤总有机碳含量,但随模拟酸雨强度的增加,土壤 pH 和土壤微生物生物量碳显著下降。2 种森林土壤湿度在不同处理下有显著差异,可能因坡度差异所致(表 1)。

2.2 模拟酸雨处理下土壤 N₂O 排放通量的季节变化

由图 1 可以看出,2 种森林土壤 N₂O 排放通量最高值通常出现在温暖湿润的生长季节(4—9 月),最低值则一般出现在干旱的非生长季(10 月—翌年 3 月),针阔叶混交林土壤 N₂O 排放通量的极大值(63.37±6.64 μg N₂O·m⁻²·h⁻¹)出现在 2017 年 6 月,极小值(0.38±0.06 μg N₂O·m⁻²·h⁻¹)出现在 2017 年 3 月,接近于零。季风常绿阔叶林土壤 N₂O 排放通量的极大值(44.99±11.59 μg N₂O·m⁻²·h⁻¹)出现在 2016 年 7 月,极小值(0.31±0.03 μg N₂O·m⁻²·h⁻¹)出现在 2017 年 3 月,接近于零。土壤 N₂O 排放通量在干湿季节间差异显著,不同模拟酸雨处理下湿季土壤 N₂O 排放通量都高于干季(表 2),模拟酸雨并未改变土壤 N₂O 排放通量的季节动态。并且 2017—2018 年间 2 种森林土壤 N₂O 排放通量普遍较低。

2.3 模拟酸雨处理下土壤 N₂O 通量与土壤温、湿度的关系

由表 3 可以看出,针阔叶混交林和季风常绿阔

表 1 不同模拟酸雨处理下土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil under different simulated acid rain treatments

森林类型 Forest type	处理 Treatment	pH	温度 Temperature (°C)	湿度 Moisture (%)	微生物生物量碳 ^[21] Microbial biomass carbon (mg · kg ⁻¹)	总有机碳 ^[22] Organic carbon (g · kg ⁻¹)
针阔叶混交林 Coniferous and broadleaved mixed forest	CK	3.8±0.0a	22.0±0.3a	24.9±0.5ab	406.0±4.6a	36.0±3.4a
	pH 4.0	3.7±0.1a	21.7±0.3a	23.7±0.5b	394.8±42.6a	38.1±2.1a
	pH 3.5	3.6±0.0a	21.9±0.3a	26.0±0.4a	387.5±6.7a	38.6±0.6a
	pH 3.0	3.7±0.0a	21.8±0.3a	25.1±0.4ab	359.5±49.0a	38.9±1.2a
季风常绿阔叶林 Monsoon evergreen broadleaved forest	CK	3.9±0.0a	21.6±0.3a	28.3±0.5a	509.2±36.5a	28.3±1.3a
	pH 4.0	3.8±0.0ab	21.6±0.3a	24.1±0.6c	488.5±19.1a	30.6±1.2a
	pH 3.5	3.8±0.0b	21.8±0.3a	25.2±0.6bc	454.7±20.1ab	35.3±2.1a
	pH 3.0	3.7±0.0b	21.7±0.3a	26.7±0.5ab	420.1±24.4b	37.4±0.3a

同列不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different letters in the same column indicated significant difference among different treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

叶林土壤 N_2O 排放通量在不同模拟酸雨处理下都与其 5 cm 深度的土壤温度和湿度呈显著正相关。鼎湖山地处亚热带季风气候区, 生长季伴随土壤温度和土壤湿度的上升, 土壤 N_2O 排放通量上升, 土壤温度和湿度是驱动土壤 N_2O 排放通量产生季节变化的重要非生物因子。

2.4 模拟酸雨处理下土壤 N_2O 排放通量的变化

由图 2 可以看出, 针阔叶混交林 5 年的观测周期内, CK、pH 4.0、pH 3.5、pH 3.0 处理的多年平均土

壤 N_2O 排放通量分别为 (17.3 ± 1.4)、(17.8 ± 1.6)、(19.5 ± 1.8) 和 (19.5 ± 1.7) $\mu\text{g } N_2O \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 各酸雨处理样方土壤 N_2O 排放通量与 CK 相比虽有增加趋势, 但未达到显著水平。

季风常绿阔叶林 5 年的观测周期内, CK、pH 4.0、pH 3.5、pH 3.0 处理的多年平均 N_2O 排放通量分别为 (12.6 ± 0.9)、(11.0 ± 0.7)、(18.0 ± 1.4) 和 (20.3 ± 2.3) $\mu\text{g } N_2O \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。与 CK 相比, pH 3.5 和 pH 3.0 处理分别上升 42.9% 和 61.1%。随着模拟酸雨强度的增加, 土壤 N_2O 排放通量逐渐增大, pH 3.5 和 pH 3.0 处理显著高于 CK, 这表明模拟酸雨促进了季风常绿阔叶林土壤 N_2O 排放, 且这种促进效应干湿季都存在 (表 2)。

3 讨论

3.1 土壤温、湿度影响森林土壤 N_2O 排放通量

土壤 N_2O 的产生主要来源于土壤中的硝化和反硝化作用。土壤温度和湿度会通过影响土壤硝化

表 2 不同模拟酸雨处理下土壤 N_2O 排放通量在干湿季节间的差异Table 2 Difference of N_2O emission flux between dry and wet seasons under different simulated acid rain treatments ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)

森林类型 Forest type	处理 Treatment	年平均 Annual mean	湿季 Wet season	干季 Dry season
针阔叶混交林 Coniferous and broadleaved mixed forest	CK	17.3±1.4a	27.1±2.1a	5.9±0.7a
	pH 4.0	17.8±1.6a	27.2±2.6a	6.3±0.8a
	pH 3.5	19.5±1.8a	30.9±2.9a	6.6±0.8a
	pH 3.0	19.5±1.7a	28.1±2.7a	8.3±0.9a
季风常绿阔叶林 Monsoon evergreen broadleaved forest	CK	12.6±0.9b	18.4±1.7bc	7.8±0.6b
	pH 4.0	11.0±0.7b	14.7±1.2c	7.1±0.5b
	pH 3.5	18.0±1.4a	26.4±2.4ab	10.0±1.0ab
	pH 3.0	20.3±2.3a	28.5±4.6a	12.9±1.3a

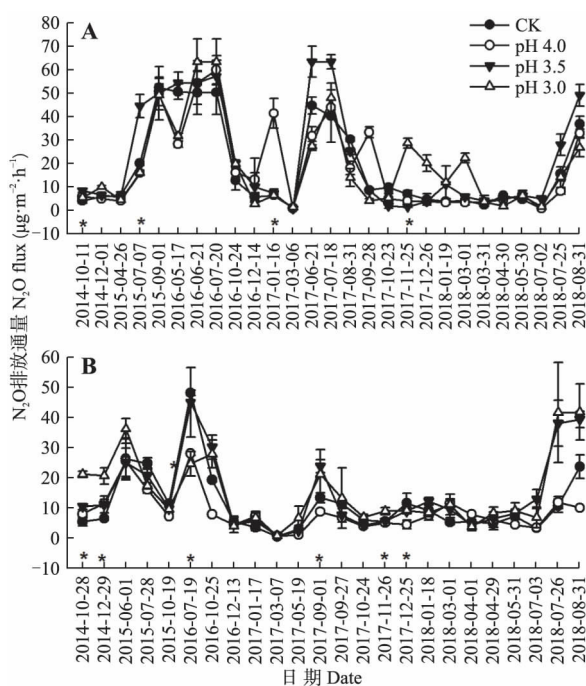


图 1 模拟酸雨处理下鼎湖山针阔叶混交林和季风常绿阔叶林土壤 N_2O 排放通量的季节动态

Fig.1 Seasonal variations of soil N_2O emission fluxes in the coniferous and broadleaved mixed forest and monsoon evergreen broadleaved forest under different simulated acid rain treatments.

A: 针阔叶混交林 Coniferous and broadleaved mixed forest; B: 季风常绿阔叶林 Monsoon evergreen broadleaved forest. 下同 The same below. * $P < 0.05$.

表 3 土壤 N₂O 排放通量与土壤温、湿度的决定系数Table 3 Determination coefficients between soil N₂O emission flux and soil temperature and humidity

森林类型 Forest type	环境因子 Environmental factor	处理 Treatment			
		CK	pH 4.0	pH 3.5	pH 3.0
针阔叶混交林 Coniferous and broadleaved mixed forest	土壤温度 Soil temperature	0.263 **	0.164 *	0.299 **	0.119 *
季风常绿阔叶林 Monsoon evergreen broadleaved forest	土壤湿度 Soil moisture	0.354 **	0.305 **	0.289 **	0.209 **
针阔叶混交林 Coniferous and broadleaved mixed forest	土壤温度 Soil temperature	0.192 **	0.089 *	0.203 **	0.110 *
季风常绿阔叶林 Monsoon evergreen broadleaved forest	土壤湿度 Soil moisture	0.134 *	0.134 *	0.229 **	0.188 **

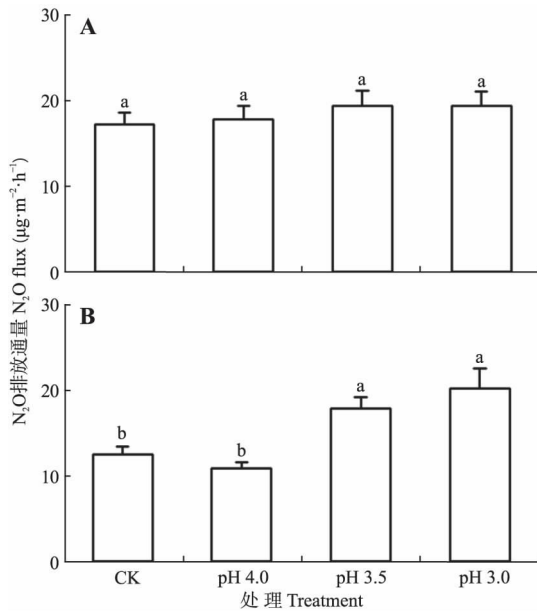
* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.图 2 模拟酸雨对鼎湖山针阔叶混交林和季风常绿阔叶林土壤 N₂O 排放通量的影响

Fig.2 Effects of simulated acid rain on soil N₂O emission fluxes in the coniferous and broadleaved mixed forest and monsoon evergreen broadleaved forest in Dinghushan.

和反硝化过程进而调控土壤 N₂O 通量。有研究指出,土壤温度上升会刺激与产 N₂O 过程相关的酶活性^[23]。其次,土壤温度上升会改变微生物种群结构,提高反硝化微生物数量及活性。这可能是因为土壤温度上升刺激土壤呼吸耗氧量的增加,为反硝化微生物的生存提供了厌氧微域环境^[24],并且土壤反硝化微生物对温度上升的敏感性大于硝化微生物^[25]。在温带地区,土壤温度与土壤 N₂O 通量之间通常表现为正相关关系^[26],而热带地区由于温度的季节变化和日变化较小,导致土壤温度与土壤 N₂O 通量之间的相关性不明显^[27]或不存在^[28]。本研究结果与温带地区的研究结果一致,这可能是由于研究地受到典型的亚热带季风气候影响,水热同期,表面上是土壤温度单因子变化,实质上也包含了土壤水分的变化,是水热因子共同作用的结果。

土壤湿度的上升也会导致土壤 N₂O 排放通量

增加。土壤湿度增大时,土壤孔隙充水,导致土壤通气性下降,形成有利于反硝化微生物生长和代谢的厌氧环境。这之前的一些研究结果类似,Davidson 等^[29]发现,湿的土壤条件下会产生更多的还原性气体 N₂O,而干旱条件则支持更多的氧化气体 NO 产生。本研究与董云社等^[30]在温带森林的研究结果存在差异,其指出在土壤水分含量介于 7%~20% 时,N₂O 排放通量随水分含量的增大而增加,但当土壤水分含量超过 20% 时,N₂O 排放通量突然降低。理论上,土壤水分含量的增加会导致土壤形成厌氧环境,促进氮素的反硝化过程,从而增加 N₂O 排放通量,但当水分含量达到一定程度时,土壤中的毛管孔隙几乎全部充满水分,阻塞了土壤空气与大气的交换速率,因而 N₂O 排放速率下降。由此可见,温带森林土壤 N₂O 排放的最适宜土壤湿度范围为 7%~20%。而在本研究中,当针阔叶混交林和季风常绿阔叶林土壤湿度超过 20% 时,土壤 N₂O 排放通量依然与土壤湿度存在正的相关性。产生这种差异的原因可能是降水量的地带性特征和土壤质地的不同,从而引起温带森林和亚热带森林土壤 N₂O 排放速率下降的土壤湿度阈值存在差异。另外,2017—2018 年的土壤 N₂O 排放通量普遍较低,可能是受到降水量的影响,据广东省肇庆市统计年鉴,2017 和 2018 年降水量分别为 1275.8 和 1798.7 mm,显著低于 2016 年的 2132.5 mm。降水减少通过改变根系周转速率、凋落物分解速率与矿化率,进而影响土壤有效碳和有效氮的含量来影响土壤微量气体产生^[31]。

3.2 模拟酸雨对南亚热带森林土壤 N₂O 排放通量的影响

N₂O 的产生是土壤硝化与反硝化作用共同参与的土壤微生物过程^[32],长期酸沉降引起土壤酸度的改变必然导致土壤微生物群落组成与结构的变化,进而影响 N₂O 的排放通量。

酸雨引起的土壤酸化,对土壤 N₂O 通量的影响取决于土壤属性(如土壤初始 pH 值、土壤温度、土

壤湿度、 NO_3^- 含量、有机碳以及微生物活性等)。本研究中,模拟酸雨降低了季风常绿阔叶林土壤 pH,显著增加了季风常绿阔叶林土壤 N_2O 排放通量。本研究结果与许多其他研究结果类似。例如,张寒等^[33]在农田生态系统开展的研究表明,酸雨处理导致土壤 N_2O 排放通量增加了 35%~71%。Šimek 等^[34]发现,酸性土壤中 N_2O 产生量明显增加。Fan 等^[35]则发现,在氮添加背景下,硫的输入对土壤 N_2O 排放起到抑制作用, SO_4^{2-} 的添加会提高土壤氧化还原电位和土壤氧化能力,抑制反硝化微生物活性和相关酶合成^[36],并且土壤 pH 并未被模拟酸雨处理所改变,从而导致土壤 N_2O 排放通量下降。本研究中,土壤 pH 降低对 N_2O 排放的促进作用主要是通过调控硝化和反硝化过程来实现的。首先,低 pH 条件下土壤产 N_2O 的真菌群落更为丰富。因为相较于细菌而言,真菌更加厚实且内部相互关联的细胞壁肽聚糖决定了其具有更强的酸耐受能力^[37]。因此,在亚热带酸性土壤中,除了反硝化细菌对 N_2O 产生的贡献外,也存在真菌调和反硝化的过程,许多真菌由于缺少 N_2O 还原酶,使得其在还原 NO_3^- 和 NO_2^- 时会导致更多的 N_2O 产生^[38]。其次,酸雨导致的土壤 pH 降低会抑制 N_2O 还原酶活性,从而降低 N_2O 被还原为 N_2 的速率,导致更多 N_2O 的产生^[39]。而 Liu 等^[40]研究发现,土壤 N_2O 排放通量与土壤 NO_3^- 含量呈正相关。酸雨在引起土壤 pH 降低的同时还会导致土壤中 NO_3^- 的积累,增加了硝化与反硝化作用的底物浓度,导致 N_2O 排放通量的上升。尽管酸雨处理显著增加了季风常绿阔叶林土壤 N_2O 排放通量,但是对针阔叶混交林 5 年观测数据的方差分析却表明,随着酸雨处理强度的增加,土壤 N_2O 排放通量并未呈现显著上升。

两种林型土壤 N_2O 排放通量对酸雨处理响应的差异可能与两个林型土壤的固有属性、植被类型以及丰度有关。首先,在模拟酸雨处理背景下,针阔叶混交林土壤 pH 并未发生明显的下降,从而对土壤 N_2O 还原酶活性的抑制作用没有季风常绿阔叶林明显。其次,季风常绿阔叶林土壤中的 NO_3^- 含量稍高于针阔叶混交林^[41],并且在相同离子输入量的背景下,由于针阔叶混交林的土壤特性,导致其土壤的离子淋溶量较高^[41],土壤中积累的有效氮含量可能并未发生明显的改变,土壤 N_2O 产生的过程和机制可能未受到酸雨处理的显著影响。最后,针阔叶混交林土壤 N_2O 排放通量对酸雨响应不敏感,还可

能与森林成熟度有关。Brumme 等^[42]和 Papen 等^[26]研究表明,植被组成是影响森林土壤 N_2O 通量的关键因子之一。与针阔叶混交林相比,季风常绿阔叶林植被类型更加复杂,土壤微生物量更高,导致两种林型土壤 N_2O 排放通量对模拟酸雨处理的响应存在差异。

参考文献

- [1] Montzka SA, Dlugokencky EJ, Butler JH. Non- CO_2 greenhouse gases and climate change. *Nature*, 2011, **476**: 43–50
- [2] Crutzen PJ. Influence of nitrogen oxides on atmosphere ozone content. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1970, **408**: 320–325
- [3] Thompson RL, Lassaletta L, Patra PK, et al. Acceleration of global N_2O emissions seen from two decades of atmosphere inversion. *Nature Climate Change*, 2019, **9**: 993–998
- [4] Skiba U, Sheppard LJ, Pitcairn CER, et al. The influence of atmosphere N deposition on nitrous oxide and nitric oxide fluxes and soil ammonium and nitrate concentration. *Water, Air and Soil Pollution*, 2004, **4**: 37–43
- [5] 中华人民共和国生态环境部. 2019 中国生态环境状况公报. (2020-05-18) [2020-11-25]. <http://www.mee.gov.cn/> [Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. 2019 bulletin on China's ecological environment. (2020-05-18) [2020-11-25]. <http://www.mee.gov.cn/>]
- [6] Menz FC, Seip HM. Acid rain in Europe and the United States: An update. *Environmental Science and Policy*, 2004, **7**: 253–265
- [7] Kirk GJD, Bellamy PH, Lark RM. Changes in soil pH across England and Wales in response to decreased acid deposition. *Global Change Biology*, 2010, **16**: 3111–3119
- [8] Wamelink GWW, Dobben HFV, van Dobben HF, et al. Effect of nitrogen deposition reduction on biodiversity and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, 2009, **258**: 1774–1779
- [9] Gruba P, Mulder J, Brozek S, et al. Modelling the pH dependency of dissolved calcium and aluminum in O, A and B horizons of acid forest soils. *Geoderma*, 2013, **206**: 85–91
- [10] Johnson J, Pannatier E, Carnicelli S, et al. The response of soil solution chemistry in European forests to decreasing acid deposition. *Global Change Biology*, 2018, **24**: 3603–3619
- [11] Lozanovska I, Kuzyakov Y, Krohn J, et al. Effects of nitrate and sulfate on greenhouse gas emission potentials from microform-derived peats of a boreal peatland: A ^{13}C tracer study. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016,

- 100**: 182–191
- [12] Simek M, Cooper JE, Picek T, *et al.* Denitrification in arable soils in relation to their physico-chemical properties and fertilization practice. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**: 101–110
- [13] Sitaula BK, Bakken LR, Abrahamsen G, *et al.* N-fertilization and soil acidification effects on N₂O and CO₂ emission from temperate pine forests soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, **27**: 1401–1408
- [14] Lu XK, Vitousek PM, Mao QG, *et al.* Plant acclimation to long-term high nitrogen deposition in an N-rich tropical forest. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, **115**: 5187–5192
- [15] Cao YZ, Wang SY, Zhang G, *et al.* Chemical characteristics of wet precipitation at an urban site of Guangzhou, South China. *Atmospheric Research*, 2009, **94**: 462–469
- [16] Liang GH, Liu XZ, Chen XM, *et al.* Response of soil respiration to acid rain in forests of different maturity in southern China. *PLoS One*, 2013, **8**(4): e62207
- [17] Jiang J, Wang YP, Yu MX, *et al.* Soil organic matter is important for acid buffering and reducing aluminum leaching from acidic forest soils. *Chemical Geology*, 2018, **501**: 86–94
- [18] Yu MX, Wang YP, Jiang J, *et al.* Soil organic carbon stabilization in the three subtropical forests: Importance of clay and metal oxides. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, **124**: 2976–2990
- [19] Yan JH, Li K, Wang WT, *et al.* Changes in dissolved organic carbon and total dissolved nitrogen fluxes across subtropical forest ecosystems at different successional stages. *Water Resource Research*, 2015, **51**: 3681–3694
- [20] Yan JH, Wang YP, Zhou GY, *et al.* Estimates of soil respiration and net primary production of three forests at different succession stages in South China. *Global Change Biology*, 2006, **12**: 810–821
- [21] 梁国华, 吴建平, 熊鑫, 等. 鼎湖山不同演替阶段森林土壤 pH 值和土壤微生物量碳氮对模拟酸雨响应. *生态环境学报*, 2015, **24**(6): 911–918 [Liang G-H, Wu J-P, Xiong X, *et al.* Responses of soil pH value and soil microbial biomass carbon and nitrogen to simulated acid rain in three successional subtropical forests at Dinghushan Nature Reserve. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(6): 911–918]
- [22] 张慧玲, 吴建平, 熊鑫, 等. 南亚热带森林土壤碳库稳定性与碳库管理指数对模拟酸雨的响应. *生态学报*, 2018, **38**(2): 657–667 [Zhang H-L, Wu J-P, Xiong X, *et al.* Effects of simulated acid rain on soil labile organic carbon and carbon management index in subtropical forests of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(2): 657–667]
- [23] 韩雪, 陈宝明. 增温对土壤 N₂O 和 CH₄ 排放的影响与微生物机制研究进展. *应用生态学报*, 2020, **31**(11): 3906–3914 [Han X, Chen B-M. Progress in the effects of warming on soil N₂O and CH₄ emission and the underlying microbial mechanisms. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(11): 3906–3914]
- [24] Maag M, Vinther FP. Nitrous oxide emission by nitrification and denitrification in the different soil types and at different soil moisture contents and temperatures. *Applied Soil Ecology*, 1996, **4**: 5–14
- [25] Castaldi S. Response of nitrous oxide, dinitrogen and carbon dioxide production and oxygen consumption to temperature in forest and agricultural light-textured soils determined by model experiment. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, **32**: 67–72
- [26] Papen H, Butterbach-Bahl K. A 3-year continuous record of nitrogen trace gas fluxes from untreated and limed soil of a N-saturated spruce and beech forest ecosystem in Germany-I. N₂O emission. *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, 1999, **104**: 18487–18503
- [27] Breuer L, Papen H, Butterbach-Bahl K. N₂O emission from tropical forest soils of Australia. *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, 2000, **105**: 26353–26367
- [28] Werner C, Kiese R, Butterbach-Bahl K. Soil-atmosphere exchange of N₂O, CH₄, and CO₂ and controlling environmental factors for tropical rain forest sites in western Kenya. *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, 2007, **112**: D03308
- [29] Davidson EA, Verchot LV. Testing the hole-in-the-pipe model of nitric and nitrous oxide emissions from soils using the TRAGNET database. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, **14**: 1035–1043
- [30] 董云社, 彭公炳. 温带森林土壤排放 CO₂、CH₄、N₂O 时空特征. *地理学报*, 1996, **51**(suppl.1): 120–128 [Dong Y-S, Peng G-B. Seasonal variations of CO₂, CH₄ and N₂O fluxes from temperate forest soil. *Acta Geographica Sinica*, 1996, **51**(suppl.1): 120–128]
- [31] Davidson EA, Ishida FY, Nepstad DC. Effects of an experimental drought on soil emissions of carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and nitric oxide in a moist tropical forest. *Global Change Biology*, 2004, **10**: 718–730
- [32] Smith KA, Ball T, Conen F, *et al.* Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: Interactions of soil physical factors and biological processes. *European Journal of Soil Science*, 2003, **54**: 779–791
- [33] 张寒, 胡正华, 陈书涛, 等. 模拟酸雨对大豆田土壤 N₂O 通量及植株和土壤氮含量的影响. *生态环境学报*, 2017, **26**(4): 590–596 [Zhang H, Hu Z-H, Chen S-T, *et al.* Effects of simulated acid rain on soil N₂O emissions and nitrogen contents of plant and soil in soybean farmland. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(4): 590–596]
- [34] Šimek M, Cooper JE. The influence of soil pH on denitrification: Progress towards the understanding of this interaction over the last 50 years. *European Journal of*

- Soil Science*, 2002, **53**: 345–354
- [35] Fan JL, Xu YH, Chen ZM, *et al.* Sulfur deposition suppressed nitrogen-induced soil N₂O emission from a subtropical forestland in southern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, **233**: 163–170
- [36] Zhang JB, Cai ZC, Cheng Y, *et al.* Denitrification and total nitrogen gas production from forest soils of Eastern China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**: 2551–2557
- [37] Rousk J, Brookes PC, Baath E, *et al.* Contrasting soil pH effects on fungal and bacterial growth suggest functional redundancy in carbon mineralization. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, **75**: 1589–1596
- [38] Shoun H, Kim DH, Uchiyama H, *et al.* Denitrification by fungi. *FEMS Microbiology Letters*, 1992, **94**: 277–281
- [39] Gundersen P, Christiansen JR, Alberti G, *et al.* The response of methane and nitrous oxide fluxes to forest change in Europe. *Biogeosciences*, 2012, **9**: 3999–4012
- [40] Liu ZQ, Li DF, Zhang JE, *et al.* Effect of simulated acid rain on soil CO₂, CH₄ and N₂O emissions and microbial communities in an agricultural soil. *Geoderma*, 2020, **366**: 114222
- [41] Jiang J, Wang YP, Yu MX, *et al.* Responses of soil buffering capacity to acid treatment in three typical subtropical forests. *Science of the Total Environment*, 2016, **563**: 1068–1077
- [42] Brumme R, Borken W, Finke S, *et al.* Hierarchical control on nitrous oxide emission in forest ecosystem. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, **13**: 1137–1148

作者简介 曹亚玲, 女, 1993年生, 硕士研究生。主要从事全球变化生态学研究。E-mail: cyaling@scbg.ac.cn

责任编辑 孙菊

曹亚玲, 俞梦笑, 江军, 等. 模拟酸雨对南亚热带典型森林土壤 N₂O 排放的影响. 应用生态学报, 2021, **32**(4): 1213–1220
Cao Y-L, Yu M-X, Jiang J, *et al.* Effects of simulated acid rain on soil N₂O emission from typical forest in subtropical southern China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(4): 1213–1220