

鼎湖山主要森林生态系统地表 N₂O 通量

周存宇¹,周国逸^{1*},王跃思²,张德强¹,刘世忠¹ (1.中国科学院华南植物园,广东 广州 510650; 2.中国科学院大气物理研究所,北京 100029)

摘要: 利用静态箱-气相色谱法对鼎湖山3种处于演替不同阶段的森林类型(季风常绿阔叶林、针阔叶混交林和马尾松林)的地表 N₂O 通量进行了1年的原位观测和研究.结果表明,3种林型地表 N₂O 通量按从大到小的顺序为:季风林>混交林>松林;不同林型间的 N₂O 通量差异与森林土壤的性质有密切关系,C/N 比值较低的季风林凋落叶对土壤中产生 N₂O 的微生物过程有较为明显的促进作用;从全年来看,松林地表 N₂O 通量的季节变化不明显,而季风林和混交林的地表 N₂O 通量在雨季存在明显的降雨驱动效应.统计分析显示在该地区影响森林地表 N₂O 通量的主要因子是土壤湿度.

关键词: 鼎湖山; N₂O 通量; 凋落物; 季节动态

中图分类号: X503.235 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2004)06-0688-04

The N₂O flux from soils of main forest ecosystems in Dinghushan. ZHOU Cun-yu¹, ZHOU Guo-yi¹, WANG Yue-si², ZHANG De-qiang¹, LIU Shi-zhong¹ (1.South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2.Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China). *China Environmental Science*, 2004,24(6): 688~691

Abstract: The N₂O fluxes from soils of three types of forest with different stages of succession in Dinghushan (monsoon evergreen broad-leaved forest, coniferous and broad-leaved mixed forest and pine forest) were observed in situ for one year using static chamber-gas chromatograph technique. In order of N₂O amount, these three types of forest was monsoon forest >mixed forest >pine forest. The difference of N₂O flux among the different forests had close correlation with their soil properties; litter in the monsoon forest of lower C/N ratio had more obvious promotion action on the microbe process of N₂O production in soil. On the whole year, the seasonal change of N₂O flux from soil of pine forest was not obvious, but the N₂O fluxes from soils of mixed forest and pine forest had dominant driving effect of precipitation in rain season. The statistic analysis showed that the key factor affecting the N₂O flux from soil in this area is soil moisture.

Key words: Dinghushan; N₂O flux; litter; seasonal dynamics

N₂O 是一种重要的温室气体,并能使臭氧层受到破坏^[1].由于人类活动的影响,近几十年来 N₂O 在大气中的含量有逐年增加的趋势^[2],因此对 N₂O 的源汇的研究成为世界各国科学家共同关注的一个热点.森林生态系统是一个重要的 N₂O 排放源,而国内对 N₂O 排放通量的研究多集中在农田和草原生态系统^[3-5],对森林生态系统,尤其是亚热带各种森林类型土壤 N₂O 释放的研究较少.本研究以鼎湖山几种主要的植被类型为对象,对森林地表 N₂O 通量和相关的环境因子进行了一年的观测,揭示了不同森林类型地表 N₂O 通量的变化特征,总结出在该地区特有气候条件下控制 N₂O 排放通量的关键因素,可为评价我国

森林生态系统的总体 N₂O 源汇功能提供依据.

1 实验方法

1.1 实验地点

实验地点设在鼎湖山自然保护区,位于广东省中西部,东经 112°30'39"~112°33'41",北纬 23°09'21"~23°11'30",面积 1155hm²,最高峰鸡笼山海拔 1000.3m.该区属南亚热带季风湿润气候,年平均降水量 1956mm,主要集中在 4~9 月份,占

收稿日期: 2004-05-31

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-01);中国科学院重要方向性项目(KSCX2-SW-120)

* 责任作者, 研究员, gyzhou@scbg.ac.cn

全年的 76%;年平均温度为 20.9 ,最冷月(1 月)和最热月(7 月)平均温度分别为 12.0 和 28.0 ;年平均相对湿度为 80.8%.在保护区内选择 3 种处于演替不同阶段的林型——季风常绿阔叶林、针阔叶混交林和马尾松(*Pinus massoniana*)林,分别对其地表 N₂O 通量及相关环境因子进行观测研究.

1.2 实验方法

N₂O 通量利用静态箱-气相色谱法测定.采样箱由底座和顶箱两部分组成,底座和顶箱均为不锈钢板制成.底座容积为 500mm×500mm×100mm,钢板厚度为 2.5mm,水封槽容积为 20mm×30mm×2.5mm;顶箱容积为 500mm×500mm×500mm,钢板厚度为 1.5mm.顶箱封顶,内装 2 个轴流混气扇、采样管、测温口.实验观测前将底座打入采样位点,由于采样点设在坡地,采样箱无法用水密封,改为在水封槽内粘贴弹性密封胶带,用于底座和箱体的密封.观测区内设置 2 种处理:采样前去除地表凋落物(S);保留地表凋落物(L+S).在每个采样点罩箱后,0,10,20,30min 分别用 100mL 医用注射器采集箱内气体 90mL,采样后及时带回实验室分析.此外,在通量测定的同时观测地表温度、5cm 深处土壤温度、气温和地下 10cm 土壤含水量.用 HP4890D 气相色谱仪测定 N₂O 浓度,N₂O 检测器为电子捕获检测器(ECD),检测器、分离柱的温度分别是 330、55,载气为高纯氮气,流速 30mL/min.温度用便携式数字温度计(JM624)测定,土壤含水量用中国生态系统网络统一配置的土壤测墒仪(MPKit)测定.

2 结果与分析

2.1 3 种林型地表 N₂O 通量的比较

对 3 种林型全年的 N₂O 通量观测值进行方差分析和多重比较发现,无论是去除地表凋落物的处理还是保留地表凋落物的处理,3 种林型地表 N₂O 通量之间均有极显著差异($P < 0.01$).保留地表凋落物时,季风常绿阔叶林,针阔叶混交林,马尾松林的地表 N₂O 通量年均值分别为 87.28 ± 13.31 , 51.91 ± 7.83 , $32.11 \pm 7.01 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;而去除地表凋

落物时,则分别为 63.48 ± 9.91 , 51.97 ± 7.84 , $30.20 \pm 6.59 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$.2 种处理条件下地表 N₂O 通量从大到小的排序均为季风林>混交林>松林.森林地表 N₂O 的排放主要来源于土壤中的硝化作用和反硝化作用,而这两种过程都是由土壤中相应功能群的微生物完成的,因此凡是能影响这些微生物代谢活动的环境因素都会对 N₂O 通量产生影响.

就自然植被而言,土壤中可直接做为硝化和反硝化细菌底物的有效氮主要来自于土壤有机质的矿化,土壤有机质的矿化产物不仅为硝化和反硝化过程提供了反应底物,而且还为参与这一过程的微生物提供了能源.从表 1 可以看出,3 种林型土壤有机质含量和可直接作为硝化反硝化作用底物的有效氮的含量(包括铵态氮和硝态氮)按由大到小的顺序均为季风林>混交林>松林,并且土壤微生物生物量也以季风林为最高^[6],这些都是季风林地表 N₂O 通量较高的物质基础.

表 1 3 种林型土壤性质的比较

Table 1 Comparison of the soil properties of the three types of forest

林型	有机质含量(%)	pH 值	全氮含量(‰)	有效氮含量(mg/kg)	微生物生物量(mgC/100g 干土)
季风林	4.5	3.76	2.89	14.67	82.2
混交林	3.3	3.80	1.32	6.95	58.8
松林	1.8	4.04	1.12	6.19	53.0

2.2 凋落物对森林地表 N₂O 通量的影响

对 3 种林型的 2 种处理的地表 N₂O 通量进行 t 检验发现,季风林的 2 种处理间 N₂O 通量有显著差异($F=3.31, df=367, P < 0.01$),而混交林和松林的 2 种处理间 N₂O 通量则无明显差异.季风林地表 N₂O 通量,保留凋落物处理明显高于去除凋落物的处理,即凋落物显著影响地表 N₂O 通量的大小.实验发现季风林凋落物分解过程中只有极少量的 N₂O 产生 [$< 5 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$],这样少量的 N₂O 显然不是 2 种处理间地表 N₂O 通量差异的主要原因.由此推测,季风林凋落物对地表 N₂O 通量的影响不是直接的,而是通过间接的方式,即凋落物在分解过程中向土壤提供微生物代谢所需的

养料,从而提高了硝化反硝化作用强度最终使得地表 N_2O 通量增大.根据黄耀等^[7]的研究,土壤中添加不同 C/N 比值的植物残余物后其释放 N_2O 的通量随之变化, N_2O 的累积释放量与所添加的残余物的 C/N 比值呈显著负相关,即 C/N 比值越小,相应的土壤 N_2O 释放量越高.本研究的 3 种林型的凋落物 C/N 比值随凋落物的组成不同而有显著差异,松林的凋落松针的 C/N 比值为 52.7,远高于季风林主要树种锥栗、荷木、黄果厚壳桂和云南银柴的凋落叶的 C/N 比值(分别为 34.7, 34.2, 32.6, 21.2)^[8],所以松林和针阔叶混交林凋落物对土壤释放 N_2O 通量的影响较小,以至于这两种林型的保留或去除凋落物的处理间地表 N_2O 通量没有显著差异,而季风林的凋落物对地表 N_2O 通量则有较为明显的影响.

2.3 森林地表 N_2O 通量的季节变化及影响因子

图 1 为 3 种林型,2 种处理条件下地表 N_2O 通量的全年变化趋势.总体来看,3 种林型地表 N_2O 通量都是雨季大于旱季,这是因为雨季温度较高,经常性的降雨使得土壤容易形成厌氧微区,有利于反硝化细菌的代谢活动.

松林地表,尤其是去除凋落物的松林地表 N_2O 通量的季节变化比较平缓,这可能是由于松林的土壤较为疏松,持水力较弱,不易形成适合反硝化细菌活动的厌氧环境,加上松林土壤所含作为反硝化作用底物的硝态氮在 3 种林型中最低,从而限制了反硝化作用,所以即使在雨季其地表 N_2O 通量也未出现较高的峰值.由图 1 可见,松林有凋落物覆盖的地表在 8 月份出现了较高的 N_2O 排放,这是由于该地区 7、8 月台风活动频繁,地表积累的大量凋落物在一定程度上影响了土壤的通气条件^[9],加上较高的温度促进了凋落物的分解,消耗了氧气,使得土壤中形成适合反硝化细菌的厌氧微区.该地区氮沉降较为严重,频繁的降雨给土壤带来了铵态氮和硝态氮,可供硝化和反硝化细菌的利用.在这些因素的共同作用下,8 月份松林有凋落物覆盖的地表 N_2O 通量出现了较高的峰值^[10].

表 2 不同林型及处理地表 N_2O 通量与土壤含水量的回归方程

Table 2 Regression equations between N_2O fluxes and soil water content in different types of forest under two treatments

林型	处理	回归方程	R^2	P
季风林	L+S	$Y=0.0027X+0.0147$	0.299	<0.01
	S	$Y=0.0018X+0.0217$	0.217	<0.01
混交林	L+S	$Y=0.0017X+0.0104$	0.251	<0.01
	S	$Y=0.0036X+0.0595$	0.455	<0.01
松林	L+S	$Y=0.0023X+0.0123$	0.396	<0.01
	S	$Y=0.0012X+0.0157$	0.383	<0.01

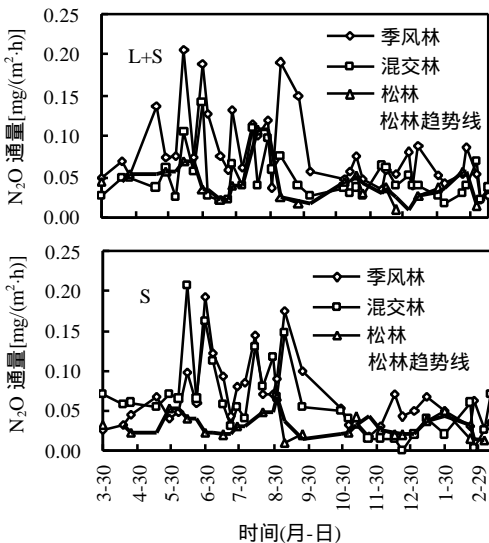


图 1 2003~2004 年不同林型 2 种处理条件下地表 N_2O 通量的季节变化

Fig.1 Seasonal change of N_2O fluxes from soils of different types of forest during 2003~2004

对各个林型 2 种处理条件下地表 N_2O 通量与气温、地下 5cm 土壤温度、地表温度和土壤含水量进行多元逐步回归发现所有林型的地表 N_2O 通量都与土壤含水量显著相关(表 2),而与其它因子没有显著相关性,说明在该地区影响森林地表 N_2O 通量的关键因子是土壤水分.雨季地表 N_2O 通量之所以总体上高于旱季,与雨季出现的若干 N_2O 通量峰值有关.在雨季每一次大于 20mm 的降雨过后,季风林和混交林地地表 N_2O 通量都会出现一个峰值,呈现出明显的驱动-响应

关系,这与徐文彬在贵州旱地土壤的观测结果完全一致^[11],说明在亚热带降雨对土壤 N₂O 释放通量的驱动效应有一定的普遍性.产生这种效应,一方面是因为降雨在增加了土壤水分的同时减少了土壤含氧量,造成适合反硝化细菌的土壤环境;另一方面是该地区的降雨中有较高的有效态氮含量^[10],为硝化反硝化细菌提供了反应底物.

图 2 为鼎湖山 2003~2004 年 N₂O 通量采样日前 3d 累积降雨量及采样当日观测点的土壤温度、地表温度和气温的变化.与图 1 结合,可见季风林和混交林地表 N₂O 通量,在雨季的每一次大于 20mm 的降雨之后都出现 1 个较高的峰值,只有 4 月 16 日 1 次例外,这与观测日的温度较低有关.在旱季的 11 月份,大于 20mm 的降雨并未引起地表 N₂O 通量的峰值产生也与此时温度较低有关,可见降雨对地表 N₂O 通量的驱动效应仅限于温度较高的雨季.松林地表 N₂O 通量全年变化不大,也未见明显的降雨驱动效应,这可能是因为松林土壤持水性能较差,不易形成厌氧环境,加之土壤较为贫瘠不利于微生物的代谢活动所致.

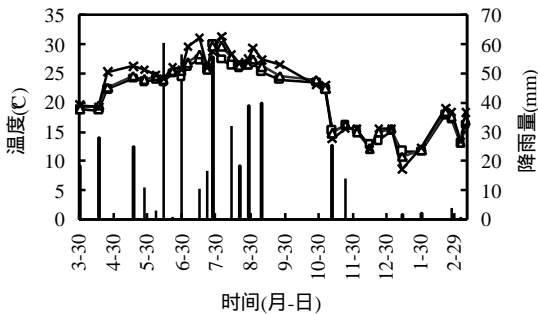


图 2 观测点降雨量及土壤温度、地表温度和气温变化
Fig.2 Precipitation, soil temperature, soil surface temperature and air temperature at the observation sites

■ 降雨量 — — 地下 5cm 土温 — — 地表温度 — · — 气温

3 结语

3.1 鼎湖山 3 种主要林型间 N₂O 通量有显著差异,按年均通量值由大到小的顺序,2 种处理条件下均为季风常绿阔叶林>针阔叶混交林>马尾松林,表现出地表 N₂O 通量随森林演替由低级到高级阶段而增高的总体趋势.

3.2 季风常绿阔叶林两种不同处理间地表 N₂O 通量的差异显著,说明在该林型的土壤条件下其凋落物分解产物对土壤硝化反硝化作用有较为明显的刺激效应,凋落物的这种效应与凋落物的物理化学性质尤其是 C/N 比值有关.

3.3 3 种林型地表 N₂O 通量的季节变化都表现为雨季高于旱季,在土壤养分较为丰富且土壤含水量较高的季风林和混交林,地表 N₂O 通量存在明显的降雨驱动效应,表明在该地区影响森林地表 N₂O 排放的关键因子是降雨和土壤湿度,且这种 N₂O 通量的降雨驱动效应在我国亚热带陆地生态系统有一定的普遍性.

参考文献：

- [1] Williams EJ, Hutchinson G L, Fehsenfeld, F C. NO_x and N₂O emissions from soil [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1992,6(4): 351-388.
- [2] IPCC. Summary for policy makers: the science of climate change [A]. IPCC Second Assessment Report [R]. 1995.
- [3] 黄国宏,陈冠雄,吴杰,等.东北典型旱作农田 N₂O 和 CH₄ 排放量研究 [J]. *应用生态学报*, 1995,6(4):383-386.
- [4] 杜睿,王庚辰,吕达仁,等.内蒙古大针茅草原 CH₄ 和 N₂O 通量的变化特征 [J]. *中国环境科学*, 2001,21(4):289-292.
- [5] 王跃思,纪宝明,黄耀,等.农垦与放牧对内蒙古草原 CO₂、N₂O 排放及对 CH₄ 吸收的影响 [J]. *环境科学*, 2001,22(6):7-13.
- [6] 易志刚,蚊伟民,周国逸,等.鼎湖山三种主要植被类型土壤碳排放的研究 [J]. *生态学报*, 2003,23(8):1673-1678.
- [7] 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.
- [8] 屠梦照,姚文华,翁轰,等.鼎湖山亚热带常绿阔叶林凋落物的特征 [J]. *土壤学报*, 1993,30(1):44-52.
- [9] 张德强,叶万辉,余清发,等.鼎湖山演替系列中代表性森林凋落物研究 [J]. *生态学报*, 2000,20(6):938-944.
- [10] 周国逸,闫俊华.鼎湖山区域大气降水特征和物质元素输入对森林生态系统存在和发育的影响 [J]. *生态学报*, 2001,21(12):2002-2012.
- [11] 徐文彬,刘广深,刘维屏.降雨和土壤湿度对贵州旱田土壤 N₂O 释放的影响 [J]. *应用生态学报*, 2002,13(1):67-70.

作者简介：周存宇(1968-),男,湖北荆州人,中国科学院华南植物园在读博士生,主要从事森林生态系统与大气间温室气体交换的研究.发表论文6篇.

致谢：本文有关降雨量和土壤有效氮含量的数据由中国科学院鼎湖山森林生态系统定位研究站的王旭和方运霆提供,在此表示感谢.