

自然状态下树木排放 N_2O 的研究

徐慧, 张秀君, 韩士杰, 王营, 陈冠雄(中国科学院沈阳应用生态研究所陆地生态系统痕量物质生态过程开放实验室, 沈阳 110015 E-mail: xuhui@iae.syb.ac.cn)

摘要: 大气中主要温室气体之一 N_2O 的部分来源尚不清楚, 以前认为只有土壤微生物过程是 N_2O 的生物源, 本文则旨在证明自然状态下植物也是 N_2O 的排放源. 采用同步空气样品采集装置和气相色谱仪观测了长白山阔叶红松林内空气 N_2O 的垂直分布特征, 发现林冠或其附近处出现高 N_2O 浓度, 高 N_2O 浓度比同一时刻其他高度处的正常 N_2O 浓度高 3.03% ~ 64.9%, 差异显著或极显著. 在林冠高度处的高 N_2O 浓度和树干高度处的正常 N_2O 浓度同时存在的现象证明了植物向外排放 N_2O , 即植物自身在自然状态下是 N_2O 的一个排放源.

关键词: N_2O ; 阔叶红松林; 林冠; 大气环境

中图分类号: XI 73 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2001)05-05-0007

N_2O Emission by Trees under Natural Condition

Hui Xu, Xiujun Zhang, Shijie Han, Ying Wang, Guanxiong Chen(The Laboratory of Ecological Process of Trace Substance in Terrestrial Ecosystem, The Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, 110015, China) .

Abstract: The sources of N_2O , one of the major greenhouse gases in the atmosphere, are still unclear till now. It was previously thought that only soil microbial process produced N_2O . The aim of this study was to provide evidences that plant can emit N_2O under the natural condition. The measurement of aboveground vertical profiles of N_2O concentrations were conducted within coniferous-deciduous mixed forests in Changbai Mountain, China. Significant high N_2O concentrations were found at or near the height of canopy. High concentrations in profiles were 3.03% to 64.9% higher than the "normal concentrations". Differences between the high concentrations and the "normal concentrations" were statistically significant. The simultaneous occurrence of high concentrations at/ nearby the canopy height and normal concentrations at the trunk space height indicated an efflux of N_2O from foliage to atmosphere. This study afforded evidences supporting that plant *per se*, besides forest soil, was an important source of atmospheric N_2O in a forest ecosystem.

Key words: N_2O ; coniferous-deciduous mixed forest; canopy; atmosphere

N_2O 是一种重要温室效应气体, 其单分子增温潜势是 CO_2 的 120 ~ 330 倍, 对全球变暖的贡献约占全部温室气体总贡献的 5% ~ 6%, 它还参与破坏平流层臭氧而增强对地表的紫外辐射. 迄今, 对导致大气 N_2O 浓度升高的外来来源并未能很好识别. 据估算, N_2O 在大气中增加量的 40% ~ 50% 尚不知来源^[1], 这是因为一些重要源未被发现或一些已知源被低估的缘故. 所以, 发现新的 N_2O 源/汇和重新评估已知源/汇的强度是当前温室效应气体研究的热点之一.

人们一直认为生物源 N_2O 仅由土壤中的微生物过程所产生^[2]. 但近年来有报道认为微生物之外的其它生物, 如植物, 也参与 N_2O 的排放或吸收过程. Lensi & Chalamet (1981) 报道植物能吸收空气中的 N_2O , 他们还报道玉米叶吸收¹⁵ N_2O 并将其用作代谢过程的氮源^[3, 4], 陈冠雄等(1990) 首次报道了植物在某些胁迫条

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (49701016, 39770066); 中科院“百人计划”项目

作者简介: 徐慧(1967~), 男, 博士, 副研究员, 主要从事生物源温室气体的产生排放机理及过程调控研究.

收稿日期: 2000-12-04

件下能释放 N_2O [5], 黄国宏等(1992)的研究则证明无菌栽培大豆植株在乙炔存在条件下能排放 N_2O [6]. 虽然上述研究结果表明植物能在一定条件下释放 N_2O , 但迄今尚无直接证据表明在自然状态下植物能排放 N_2O .

本研究观测了长白山自然保护区 2 种阔叶红松林空气 N_2O 浓度的垂直分布特征, 发现林冠层及其附近空气的 N_2O 浓度显著高于环境背景 N_2O 浓度, 从而证实树木在自然状态下能排放 N_2O .

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验地点位于我国长白山自然保护区境内 ($42^{\circ}24' \text{N}$, $128^{\circ}28' \text{E}$). 共设 2 个林内采样地点和 1 个林外空地采样地点. 其中, 一个林内采样地点位于约 290 年林龄、平均林冠高度为 28 m 的原始阔叶红松林(称为“样地 I”); 另一个位于 10 年林龄、平均林冠高度 3.2 m 的次生阔叶红松林(称为“样地 II”); 林外空地则是紧邻样地 II、由次生阔叶红松林伐树后形成的一片空地. 样地 I 具有较明显的林冠下边界, 其高度约为 7 m, 而样地 II 没有明显的林冠下边界. 样地 I 和样地 II 处的林冠密度为 0.8 和 0.7. 2 个采样地点土壤均为暗棕色森林土, 年均降水量 800 mm, 年平均温度 3.3°C , 土壤 pH 值为

5.67/4.75 ($\text{H}_2\text{O}/\text{KCl}$). 采样地点阔叶红松林中的主要树种为红松 (*Pinus koraiensis*), 常见树种有椴树 (*Tilia amurensis*)、水曲柳 (*Fraxinus mandshurica*) 和风桦 (*Betula costata*) 等. 5~7 cm 深度土壤的细菌、放线菌和真菌的数量 (单位: 10^4 个/g 干土) 及占总数比例分别是: 1359.14 (59.9%)、477.13 (21.06%)、431.60 (19.05%).

1.2 空气样品同步采集装置

2 个高各为 61.75 m 和 5.00 m 的塔分别垂直竖立于样地 I 和样地 II. 多根空气样品采集管 (内径为 5.0 mm 的不锈钢管) 分别从塔的不同高度 (见表 1) 引至地面距塔基 10 m 远处. 每次采样过程分 2 个步骤: 步骤 ① 由图 1 中状态 A 示意, 首先, 将采样管的出口端接于真空泵, 启动真空泵并打开多通阀, 采样管内空气开始自上向下流动, 空气流速由流量计控制在 $200 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$, 这样, 位于不同采样高度处的空气就以同一速度流过样品采集管. 步骤 ② 由图 1 中状态 B 示意, 当状态 A 进行 25 min 后, 关闭多通阀, 将负压采样器 (500 ml) 接于各采样管上, 打开多通阀, 来自相应采样管内的空气样品在采样器内的负压作用下充入各采样器. 将采样器中的空气样品转移至储气袋中, 运回实验室分析空气样品的 N_2O 浓度.

1.3 离体树木枝叶 N_2O 排放速率的测定

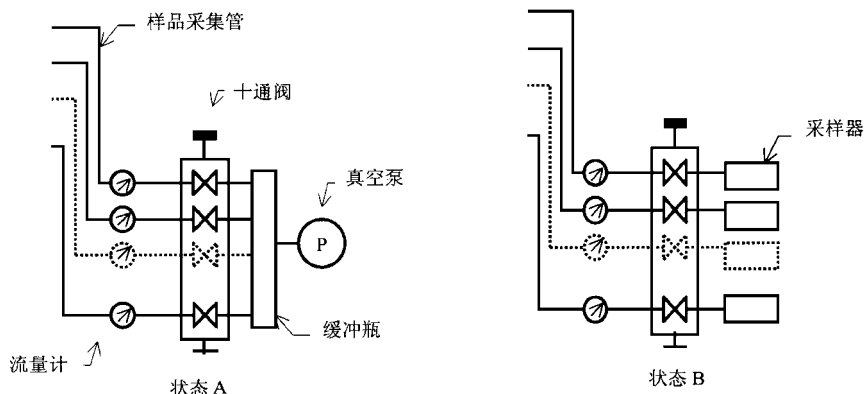


图 1 空气样品同步采集装置示意图

Fig. 1 Schematic representation of synchronously air sampling instrumentation

将采摘下的水曲柳枝叶约 200g 立即置于 3400 ~ 3800 ml 体积的 PVC 袋中,封闭袋口,用气密性注射器分别于 0、20、40 min 时采集袋内气体样品 60 ml,转移至储气袋中,运回实验室测定其 N_2O 浓度。

1.4 N_2O 浓度的气相色谱分析

用岛津 GC-14A 气相色谱仪分析从每个储气袋中抽出的多个空气样品(1 ml)的 N_2O 浓度。分析条件为:电子捕获检测器(ECD),Porapak-Q 用作前置柱(1 m)和分析柱(2 m)的填充料,由十通阀来控制载气(99.999 %高纯氮气)的流向,使样品中的水蒸汽及其它更重物质从前置柱中被反吹出去,而使 N_2O 等物质在分析柱中被分离出来。检测器温度是 300°C,柱温 60°C,进样口温度 100°C。标准 N_2O 样品($0.303 \mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.959 \mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$) 由国家标准物质研究中心提供。样品 N_2O 浓度的定量由比较样品与标准 N_2O 样品的峰高计算得来。

1.5 统计分析

由 SPSS 8.0 软件中的方差分析程序(ANOVA)检验来自不同高度空气样品 N_2O 浓度的差异显著性。

2 结果

本研究在 1998 和 1999 年夏季共进行了 12 次林内空气 N_2O 浓度垂直分布测定(其中,样地 I 进行 10 次测定,样地 II 进行 2 次测定)和 1 次林外空地观测。在林内的 12 次观测试验中,有 6 次观测发现不同高度处空气 N_2O 浓度间存在显著差异,本文将其分别标记为观测 A、B、C、D、E 和 F,观测结果列于表 1。

2.1 样地 I 的空气 N_2O 浓度垂直分布

观测 A、B、C 和 D 分别于 1998-09-20 T09:45、1999-09-17 T10:06、1999-09-17 T10:36 和 1999-09-17 T14:20 测定。观测 A 中,15.75 m 高度处的空气 N_2O 浓度($0.382 \mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$)明显高于其它高度处的 N_2O 浓度,差异极显著($P < 0.01$),此浓度约比 61.75 m 处的 N_2O 浓度($0.306 \mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$)高 24.7%。样地 I 的林冠上缘平均高度是 25.44 m、林冠下缘平均高度是

7.00 m,15.75 m 恰处于林冠层的中心区域。

在观测 B、观测 C 和观测 D 中,分别发现 7.50、32.00 和 15.75 m 高度处出现差异极显著的高 N_2O 浓度($P < 0.01$),它们分别为 0.518 、 0.357 和 $0.326 \mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$,比同一时刻 60.75 m 高度处的 N_2O 浓度分别高 64.9%、15.9% 和 5.8%。出现高 N_2O 浓度的这 3 个高度(7.50、32.00 和 15.75 m)均处于林冠上、下界面之间或其附近。

2.2 样地 II 的空气 N_2O 浓度垂直分布

观测 E 是 1998-07-02 T10:00 样地 II 的 0 ~ 3.5 m 高度范围内不同高度处空气 N_2O 浓度同步观测结果(见表 1)。其中,3.20 和 3.30 m 高度处的空气 N_2O 浓度分别是 0.322 和 $0.323 \mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$,它们显著高于其他高度处(除地表处外)的 N_2O 浓度($P < 0.05$),而在 0.40、2.00 (树干高度)和 3.50 m(林冠上方 30 cm)处的 N_2O 浓度则较低,分别是 0.309 、 0.308 和 $0.309 \mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$,高 N_2O 浓度比低 N_2O 浓度高约 4.4%。在观测 F(1998-08-16 T15:20)中,发现在 3.40 m 高度和地表 2 处的 N_2O 浓度要显著高于 4.30 m(即林冠上方 1 m)和 2.80 m 处的 N_2O 浓度。3.40 m 和地表处的 N_2O 浓度分别是 0.306 和 $0.324 \mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$,它们分别比林冠上方 1 m 处的 N_2O 浓度($0.297 \mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$)高 3.2% 和 7.8%(差异显著, $P < 0.05$)。在观测 E 和 F 中,高 N_2O 浓度恰好位于林冠上缘上方 10 cm 处。

2.3 林外空地 N_2O 浓度垂直分布

在无风气候条件下观测了与样地 II 相邻的一块空地 0 ~ 5 m 高度范围内 5 个不同高度处的空气 N_2O 浓度,未发现不同高度处 N_2O 浓度间有显著差异。

2.4 水曲柳离体枝叶 N_2O 排放速率

在 0 ~ 40 min 内封闭罩中 N_2O 浓度呈显著上升趋势(见图 2),封闭罩内的空气 N_2O 度由 0 时刻的 $0.3250 \mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升到第 20 min 的 $0.5442 \mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$ 和第 40 min 时的 $0.7088 \mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$ 。水曲柳枝叶的 N_2O 排放速率为 $22.99 \pm 4.06 \text{ ng} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ (20 min 内)。

表 1 样地 I 和 II 的空气 N₂O 浓度垂直分布/μg·L⁻¹

Table 1 Above-ground N₂O concentration profiles at two sites in a primary forest and a secondary forest

样地	高度/ m	采样时间 Sampling time/ 年-月-日-时-分			
		观测 A	观测 B	观测 C	观测 D
		(1998-09-20 T09 :45)	(1999-09-17 T10 :06)	(1999-09-17 T10 :36)	(1999-09-17 T14 :20)
样地 I	0.40	0.305(0.015) ^a A ^b	0.322(0.021) A	0.321 (0.006) A	0.308 (0.006) A
	5.20	0.306(0.012) A	0.297(0.004) A	0.316 (0.010) A	0.301 (0.016) A
	7.50	0.308(0.021) A	0.518(0.030) B	0.311 (0.011) A	0.298 (0.016) A
	11.45		0.311(0.033) A	0.321 (0.015) A	0.299 (0.012) A
	15.75	0.382(0.048) B	0.306(0.014) A	0.317 (0.009) A	0.326 (0.002) B
	18.15		0.310(0.022) A	0.318 (0.008) A	0.301 (0.009) A
	20.99	0.316(0.025) A	0.275(0.047) A	0.317 (0.012) A	0.309 (0.006) A
	22.39		0.313(0.019) A	0.317 (0.018) A	0.313 (0.004) A
	25.44 ^d	0.309(0.017) A	0.320(0.030) A	0.311 (0.017) A	0.308 (0.006) A
	28.52	0.314(0.015) A	0.306(0.018) A	0.305 (0.005) A	0.311 (0.008) A
	30.64	0.311(0.022) A	c	0.304 (0.009) A	0.306 (0.005) A
	32.00		0.324(0.030) A	0.357 (0.017) B	0.311 (0.007) A
	40.00		0.274(0.034) A	0.311(0.014) A	0.312 (0.007) A
	61.80	0.306(0.012) A	0.314(0.035) A	0.308 (0.020) A	0.308 (0.008) A
样地 II	高度/ m	观测 E(1998-07-02 T10 :00)		高度/ m	观测 F(1998-08-16 T15 :20)
	0.00	0.313 (0.008) AB		0.00	0.320 (0.015) C
	0.40	0.309 (0.006) A		1.30	0.305 (0.007) AB
	2.00	0.308 (0.006) A		2.80	0.297 (0.009) A
	3.20 ^d	0.322 (0.006) B		3.30 ^d	0.301(0.009) AB
	3.30	0.323 (0.006) B		3.40	0.306 (0.009) B
	3.50	0.309 (0.005) A		3.50	0.304 (0.010) AB
				3.80	0.301 (0.011) AB
				4.30	0.297 (0.012) A

a. 括号内数值为标准误 (SE) b. 不同字母表示空气 N₂O 浓度测定平均值存在显著差异(*P* < 0.05) c. 指此高度处未进行测试 d. 指此高度为林冠高度

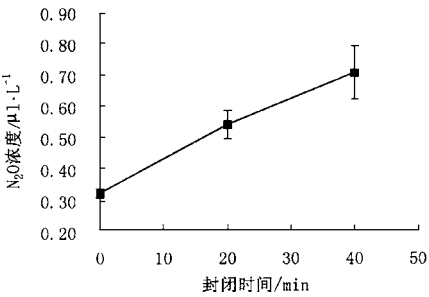


图 2 水曲柳离体枝叶封闭罩内的 N₂O 浓度变化

Fig. 2 N₂O accumulation from branches and leaves of Manchurian ash within enclosed bags

3 讨论

本研究将不同高度处空气样品同步采集装置和空气 N₂O 浓度的气相色谱分析法相结合,

建立了一种测定森林生态系统空气 N₂O 浓度垂直分布的方法. 长白山阔叶红松林空气 N₂O 浓度的垂直分布的观测结果表明采用这一方法研究森林空气 N₂O 浓度垂直分布是可行的, 因为此方法允许对不同高度处空气样品进行同步取样, 也可以检测到不同高度处空气 N₂O 浓度间的显著差异.

本研究进行的 12 次观测中有 6 次观测发现了空气 N₂O 浓度垂直分布中存在显著的高 N₂O 浓度, 表明在阔叶红松林空气 N₂O 浓度垂直分布中确实存在高 N₂O 浓度, 这不是偶然现象, 而是一个可重复验证的自然现象.

从样地 I 的 4 个观测结果中(观测 A、B、C 和 D)发现高 N₂O 浓度分别出现在林冠上边界(31.00 m)和下边界(7.00 m)之间或其附近, 即: 15.75、7.50、15.75 和 32.00 m. 在样地 II

的 2 次观测结果中,除地表出现高 N_2O 浓度之外,高 N_2O 浓度仅出现在林冠上边界及其上方 10 ~ 20 cm 处.这种在林冠高度及其附近空气中存在高 N_2O 浓度的现象尚未见报道.

若土壤是森林生态系统中的唯一 N_2O 排放源,则根据气体扩散原理,在适宜的气象条件下(无风或微风时),空气 N_2O 浓度随高度上升而下降,从而,林冠处 N_2O 浓度一定比树干高度处的 N_2O 浓度低.但是,若在林冠及其附近处出现高 N_2O 浓度,而在林冠下方的树干高度处反而没有出现高 N_2O 浓度,这就可以推断林冠处高 N_2O 浓度是来自于植物树冠排放 N_2O 的结果.所以,林冠高度处空气存在高 N_2O 浓度为植物在自然状态下能排放 N_2O 提供了一个直接证据.同时,采用封闭罩法测定出水曲柳新鲜离体枝叶也有较强的 N_2O 排放速率,这也补充证明了植物能释放 N_2O .水曲柳离体枝叶的 N_2O 排放速率[$22.99 \pm 4.06 \text{ ng} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$]与长白山阔叶红松林土壤的 N_2O 排放速率[以 $N_2O \cdot N$ 计 $32 \text{ ng}(\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$]^[7]相近.

目前,对植物排放 N_2O 现象的机理有 2 种可能解释:第一,植物只起传输作用, N_2O 只由土壤中的微生物过程产生,所产生的 N_2O 溶解到土壤水中,土壤中的水通过蒸腾作用传输到植物叶片后,经由气孔释放至周围空气中. Chang 等(1998)的研究结果就认为植物并不直接产生 N_2O ,它只起着将土壤中所产生的 N_2O 传输出去的作用^[8].杨思河等(1998)也报道了几种针叶和阔叶树种的 N_2O 排放速率随温度上升和呼吸速率加快而增加,并认为气孔在其中起着关键的调节作用^[9].第二,植物在其自身生理代谢过程中产生 N_2O 并将其排放至周围大气.黄国宏等(1992)观察到无菌大豆植株在有 C_2H_2 存在的条件下能释放 N_2O ,这一研究结果指出了植物自身释放 N_2O 的可能性,因为在供试系统中没有微生物存在^[6].尽管上述 2 种可能机制分别有不同的研究结果予以支持,但目前尚无法明确在自然状态下是其中一种机制在起作用,还是 2 种机制同时在起作用.

若要区分自然状态下所排出的 N_2O 究竟是来自土壤微生物还是来自植物本身,还需要采用氮的稳定性同位素实验技术进行深入研究.

以往估算森林生态系统的 N_2O 排放量时,仅计算了土壤的 N_2O 排放量^[10, 11],若证明植物在自然状态下能排放 N_2O ,则找出了一个新的 N_2O 排放源,这对重新评估森林生态系统对 N_2O 排放的贡献具有重要意义.

4 结论

本研究观测了长白山阔叶红松林空气 N_2O 浓度的垂直分布,发现长白山阔叶红松林的林冠内或其上方不远处出现显著或极显著的高 N_2O 浓度.数次观测结果证明这不是偶然现象,而是一种可重复验证的现象.这种空气 N_2O 浓度垂直分布特征表明在森林生态系统中植被本身也是一个重要的 N_2O 排放源.

参考文献:

- 1 Kim K R, Craig H. Nitrogen-15 and oxygen-18 characteristics of nitrous oxide: a global perspectives. *Sciences*, 1993, **262**: 1855 ~ 1857.
- 2 Bouwman A F. Exchange of greenhouse gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere. In: Bouwman A F (Ed). *Soils and the Greenhouse Effect*. Chichester: Wiley, 1990. 61 ~ 127.
- 3 Lensi R, Chalamet A. Absorption of nitrous oxide by shoots of maize. *Plant Soil*, 1981, **59**: 91 ~ 98.
- 4 Grundmann G L, Lensi R, Chalamet A. Delayed NH_3 and N_2O uptake by maize leaves. *New Phytol.*, 1993, **124**: 259 ~ 263.
- 5 陈冠雄等. 植物释放氧化亚氮的研究. *应用生态学报*, 1990, **1**(1): 94 ~ 96.
- 6 黄国宏等. 无菌大豆植株释放 N_2O 的研究. *植物学报*, 1992, **34**(1): 835 ~ 839.
- 7 徐慧等. 长白山主要森林生态系统土壤-大气间 N_2O 和 CH_4 气体交换的研究. 王庚辰, 温玉璞 主编. *温室气体浓度和排放监测及相关过程*. 北京: 中国环境出版社, 1996. 358 ~ 373.
- 8 Chang C et al. Nitrous oxide emission through plants. *Soil SCI. SOC. AM. J.*, 1998, **62**: 35 ~ 38.
- 9 杨思河, 陈冠雄等. 几种木本植物的 N_2O 释放与某些生理活动的关系. *应用生态学报*, 1995, **6**(4): 337 ~ 340.
- 10 Castro M S et al. Exchange of nitrous oxide and methane between the atmosphere and soils in spruce-fir forests in the northeastern United States. *Biogeochemistry*, 1993, **18** (3): 119 ~ 135.
- 11 Kreileman G J J, Bouwman A F. Computing land use emissions of greenhouse gases. *Water, Air and Soil Pollution*, 1994, **76**: 231 ~ 258.