

鼎湖山典型森林地表卤代烃通量对氮沉降的响应

吴旺旺 郑丽丽 黄幸然 胡宝叶 易志刚*

(福建农林大学资源与环境学院,福州 350002)

摘要 卤代烃(volatile halogenated organic compounds, VOX)是一类已被公认的大气环境污染物,能导致臭氧层空洞和温室效应。虽然海洋是卤代烃主要的源汇区,但是森林生态系统地表卤代烃通量对全球卤代烃循环也存在着重要贡献。全球氮沉降量逐年增加,严重影响森林生态系统的结构与功能,从而导致地表卤代烃源汇发生改变。本研究运用静态箱及大气预浓缩仪-GC-MS系统分析了鼎湖山马尾松林(PF)和季风常绿阔叶林(BF)地表卤代烃通量及其对氮沉降的响应。结果表明:自然氮沉降下,马尾松林地表为卤代烃的汇,吸收速率最大的化合物为1,1,2-三氯乙烷,达 $-428.32 \text{ pmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;施氮促进卤代烃排放,且中氮效果显著,地表由“汇”变成“源”;阔叶林地表为卤代烃的源,氮增加抑制其排放,部分卤代烃由“源”变为“汇”,对照样地与氮处理样地存在显著差异。自然氮沉降下,林型间卤代烃通量存在显著差异,加氮后差异减弱甚至消失。加氮处理样地,马尾松林中氯乙烯与1,2-二氯丙烷、1,1,2-三氯乙烷显著相关,阔叶林中氯甲烷与氯乙烯、氯乙烷及氯苯显著相关,而氯苯与大部分被测卤代烃都具有显著的相关性,说明部分卤代烃对氮沉降可能有相同的响应机制。自然氮沉降下,阔叶林卤代烃通量日变化无明显规律,但高氮处理样地,各化合物表现基本一致,在07:00出现释放小高峰,最大吸收则主要出现在13:00。

关键词 卤代烃; 氮沉降; 森林; 挥发性有机化合物; 鼎湖山

Responses of volatile halogenated organic compounds fluxes from forest floor to simulated nitrogen deposition in Dinghushan. WU Wang-wang, ZHENG Li-li, HUANG Xing-ran, HU Bao-ye, YI Zhi-gang* (College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China).

Abstract: Volatile halogenated organic compounds (VOX) are known as atmospheric pollutants which contribute to stratospheric ozone depletion and global warming. Although ocean is considered to be the major source and sink of VOX, VOX from forest ecosystems still have significant effect on global VOX cycle. Increasing global nitrogen deposition plays a great role in structure and function of forest ecosystems, leading to changing of VOX uptake and emission from forest floor. Static chamber coupled with preconcentrator-GC-MS technique was employed to study the responses of VOX fluxes from forest floor with simulated elevated nitrogen deposition in two major forests, namely pine forest (PF) and monsoon evergreen broadleaf forest (BF) in Dinghushan. The results showed that PF floor acted as sink for VOX at the control sites, with the maximum uptake rate of $-428.32 \text{ pmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ for 1,1,2-trichloroethane. The uptake rates of VOX decreased with enhanced nitrogen deposition, and the medium nitrogen addition had a significant influence on VOX flux in PF, with the change from sink to source. BF floor acted as source for VOX at the control sites. The emission rates of VOX decreased with enhanced nitrogen deposition, with a significant difference between the control and nitrogen addition sites, and BF forest floor changed from source to sink for some VOXs. Significant differences were found between forests at the control sites, but the difference diminished or even disappeared with nitrogen addition. Significant correlations were observed between vinyl-chloride and 1,2-dichloropropane and

国家自然科学基金项目(41473083, 41173090)资助。

收稿日期: 2016-01-05 接受日期: 2016-03-16

* 通讯作者 E-mail: zgyi@fafu.edu.cn

1,1,2-trichloroethane at nitrogen addition sites in PF. In BF, significant correlations were also found between chloromethane and vinyl-chloride, chloroethane and chlorobenzene, and between chlorobenzene and most tested VOXs. These results indicated the same mechanism of response of the tested VOXs to nitrogen deposition in forest floor. There were no obvious diurnal variations for VOX fluxes at the control site, but a small emission peak appeared at 07:00 and the highest up-take rates were observed at 13:00 for most of the VOXs at high nitrogen addition sites in BF.

Key words: volatile halogenated organic compounds (VOX); nitrogen deposition; forest; volatile organic compounds (VOCs); Dinghushan.

卤代烃(volatile halogenated organic compounds, VOX)是一种重要的挥发性有机化合物,其来源包括植物与微生物等生命体、土壤、生物质燃烧及火山爆发等自然源和人为源(工业溶剂的使用)(Frische *et al.* 2006; Ruecker *et al.* 2014)。它能产生光化学烟雾(Liu *et al.* 2000)、破坏臭氧层(Solomon *et al.* 1992)、促进温室效应(Molina *et al.* 1974)、危害人体健康(Ken *et al.* 2004)。海洋是大气中卤代烃主要的源汇区,故目前对卤代烃通量的研究主要集中在海洋。尽管森林地表VOCs对陆地生态具有重要作用,但有关森林地表VOCs(卤代烃)通量及其影响因素的报道却较少。实际上,陆地生态系统卤代烃的吸收与释放对全球卤代烃的汇源平衡有一定的贡献作用(Gribble 1994)。

森林地表既是“源”也同时是“汇”。研究表明,陆地植物、真菌、地衣、细菌、昆虫和一些高等动物都能产生有机卤素(Gribble 2003)。同时,一些生物也能吸收卤代烃,是卤代烃的汇。例如,Roy等(2011)研究阿拉伯海卤代烃通量认为微生物呼吸能消耗四氯甲烷。Watling等(1998)研究发现,不同森林的植物具有明显的 Cl^- 含量差异,而植物 Cl^- 含量大小能影响 CHCl_3 通量。光照及土壤温湿度也能通过影响植物和土壤微生物的代谢活动而影响卤代烃的合成与释放。所以森林地表释放或吸收的卤代烃出现差异是生物因素(植物、微生物等)和周围环境共同作用的结果。

全球氮沉降量正逐年上升,严重影响了地球环境,不仅使酸雨从硫酸型向硫酸-硝酸混合型转变,还能导致土壤pH降低(李秋玲等 2013)、影响生物多样性(张燕等 2007; 鲁显楷等 2008),严重干扰了森林生态系统的结构与功能。森林生态系统中卤代烃主要来自土壤微生物(Khalil *et al.* 1999)、凋落物及植物根系(Saini *et al.* 1995),故卤代烃交换通量也可能受到氮沉降的影响。

广州鼎湖山国家自然环境保护区位于我国东南

部,1999年降水氮沉降量已达 $38.4 \text{ kg N hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (周国逸等 2001),属于氮沉降严重区。因此,在全球氮沉降增加的趋势下,研究鼎湖山典型森林马尾松林和季风常绿阔叶林地表卤代烃通量对大气氮沉降的响应具有重要意义,不仅可以了解森林生态系统卤代烃吸收与释放情况,而且可以正确评估氮沉降下森林生态系统土壤卤代烃对全球物质循环与能量流动的贡献。

1 研究地区与研究方法

1.1 样地概况

鼎湖山国家级自然保护区($23^\circ 09' 02'' \text{ N}$ — $23^\circ 11' 30'' \text{ N}$, $112^\circ 30' 39'' \text{ E}$ — $112^\circ 33' 41'' \text{ E}$)位于广东省中西部,气候为亚热带湿润季风型气候,水热资源丰富,年平均气温 21.4°C ,最冷月为1月,平均温度 12.6°C ,最热月为7月,平均温度 28.0°C 。干、湿季明显,4—9月为湿季。年均降雨量为1678 mm,年均蒸发量为1115 mm,年均相对湿度为82%(刘效东等 2014)。

1.2 实验设计

选取亚热带代表性森林类型:演替初期的马尾松林(PF)和处于演替顶极的季风常绿阔叶林(BF)为研究对象,由于采样时间与Huang等(2012)同期,可参考其土壤理化性质,见表1。

表1 不同氮处理下鼎湖山马尾松林和阔叶林土壤(0~10 cm)理化性质

Table 1 Soil properties (0–10 cm) and their responses to nitrogen additions in PF and BF

森林类型	氮处理	pH	有机质 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	总氮 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
马尾松林	对照	3.89	24.0	0.95
	低氮	3.82	25.2	0.96
	中氮	3.78	21.7	0.85
常绿阔叶林	对照	3.70	41.9	1.85
	低氮	3.69	44.4	1.88
	中氮	3.59	44.7	1.80
	高氮	3.62	45.0	1.77

数据来源于(Huang *et al.* 2012)。

在 PF 和 BF 分别设置 9 和 12 个氮处理样方 (10 m × 20 m), 开展模拟氮沉降增加实验。其中 BF 设置 4 个处理: 对照 (0 kg N hm⁻² · a⁻¹, CK)、低氮 (50 kg N hm⁻² · a⁻¹, LN)、中氮 (100 kg N hm⁻² · a⁻¹, MN) 和高氮 (150 kg N hm⁻² · a⁻¹, HN), PF 设置 3 个氮处理, 即对照 (CK)、低氮 (LN) 和中氮 (MN)。每个处理均设 3 个重复。自 2003 年 7 月起, 每月月底喷施 NH₄NO₃。模拟氮沉降的具体方法参阅文献 (Mo *et al.* 2006)。

1.3 样品采集与处理

每个样方中随机设置 1 个由内附特氟龙膜的 PVC 材料制成静态箱, 采样箱由底箱 (直径 25 cm, 高 10 cm) 和顶箱 (直径 25 cm, 高 35 cm) 两部分组成, 顶箱内置一小风扇用于气体混合, 减少箱内气体浓度梯度带来的误差。采样箱设计参阅文献 (Wei *et al.* 2008)。底箱打入地下 2 ~ 3 cm 时应尽量避免损毁植物根系, 保留地表凋落物。样品采集均在 10:00 开始, 并分别在顶箱罩住底箱后 0 和 30 min 采集箱内气体样品 500 mL, 保存在 2 L Tedlar 气袋中。同时, 分析阔叶林对照和高氮样地地表卤代烃通量日变化情况 (每 3 h 收集一次)。样品采集在 2012 年 3 月中旬进行。

采样同时利用热电偶温度计 (TES Electronic Corp., Taipei, Taiwan) 测定气温和土壤 5 cm 温度; 利用土壤湿度传感器 (Delta-T Devices Ltd., Cambridge, England) 测定土壤 5 cm 湿度。

1.4 样品分析与统计

利用 Entech 7100 预浓缩系统和 Agilent 7890A/5975 GC-MS 分析卤代烃。样品经预浓缩三级液氮冷阱, 去除样品中的 H₂O 和 CO₂, 并经 -150 °C 冷聚焦进入 GC-MS 分离检测。色谱条件: HP-5 色谱柱 (30 m × 250 μm × 0.25 μm), 升温程序为: 初始温度 40 °C, 保持 3 min, 后以每分钟 3 °C 升到 140 °C; 再以每分钟 10 °C 升温至 240 °C, 保持 3 min; 质谱条件: EI 电离源, 电离电压 70 eV, 离子源温度 270 °C, 数据采集采用单扫模式 (SIM)。采用标准质谱图库 (NIST08)、标准气体保留时间双重条件定性, 峰面积-浓度标准曲线内标法定量。具体操作见郑丽丽等 (2015) 的方法。

气体通量是指单位时间单位面积箱内该气体的流通量, 正值表示地表释放该气体, 为“源”, 负值表示地表吸收该气体, 为“汇”, 用公式 (1) 表示为:

$$F = \frac{\Delta C \times V}{\Delta t \times A} \quad (1)$$

式中, F 为气体通量 (pmol · m⁻² · s⁻¹), ΔC 为单位时间内气体的体积摩尔浓度差 (pmol · m⁻³), V 为静态箱的有效容积 (m³), Δt 为封闭时间 (h), A 为被覆盖的地表面积 (m²)。

利用 SPSS 20.0 进行单因素方差分析 (ANOVA), 然后以 LSD 多重检验法检验地表卤代烃通量在不同林型间和施氮水平间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 自然氮沉降下森林地表卤代烃通量

分析得到 30 种卤代烃, 马尾松林地表面释放 9 种卤代烃, 释放速率介于 0.001 ~ 50.499 pmol · m⁻² · s⁻¹, 释放较大的有反式-1,3-二氯丙烯和氯乙烷, 分别占马尾松地表卤代烃释放总量的 49.90% 和 43.49%; 剩余的 21 种卤代烃均表现为吸收, 吸收速率在 -428.323 ~ -0.043 pmol · m⁻² · s⁻¹, 吸收量较大的有 1,1,2-三氯乙烷、1,2-二氯丙烷、1,1,2,2-四氯乙烷和氯苯, 分别占马尾松林地表面卤代烃吸收总量的 54.64%、18.75%、7.69% 和 7.46% (图 1A)。

阔叶林地表面吸收 5 种卤代烃, 吸收通量较大的为反式-1,3-二氯丙烯 (-15.595 pmol · m⁻² · s⁻¹) 和

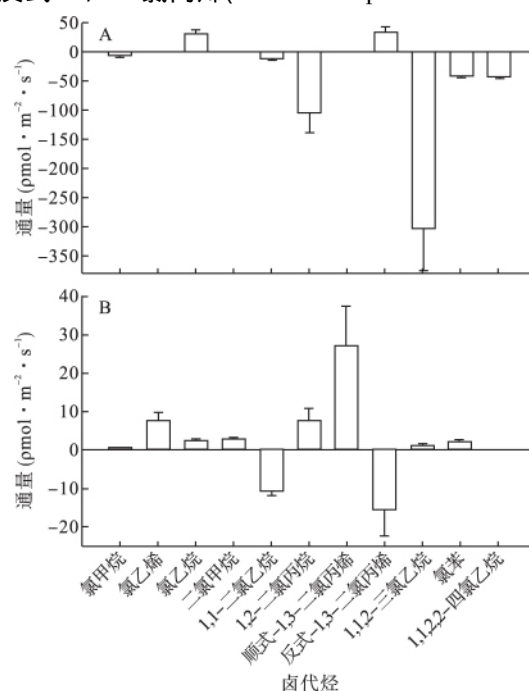


图 1 自然氮沉降下马尾松林 (A) 和阔叶林 (B) 地表卤代烃通量

Fig. 1 Flux of VOX in PF (A) and BF (B) floor with natural nitrogen deposition

1,1-二氯乙烷 ($-10.743 \text{ pmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 分别占阔叶林地表吸收总量的 57.69% 和 39.74%。其余卤代烃主要表现为释放, 释放速率为 $0.006 \sim 45.132 \text{ pmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 释放量较大的有顺式-1,3-二氯乙烯 (47.21%)、1,2-二氯丙烷 (13.27%)、氯乙烯 (13.38%) 和二氯甲烷 (5.12%) (图 1B)。

自然氮沉降下, 马尾松林和阔叶林地表卤代烃通量差异较明显, 马尾松林地吸收卤代烃较多, 主要作为“汇”, 而阔叶林地表主要表现为“源”, 以释放为主。Ramirez 等 (2010) 研究了美国卡尔霍恩实验林中两种林型土壤和凋落叶释放的 VOCs, 结果表明, 不同种微生物排放的 VOCs 种类和数量不同。Gray 等 (2012) 研究表明, 当凋落叶分解变得不稳定时 (高细胞可溶性化合物含量和低半纤维素和纤维素含量) 凋落叶释放 VOCs 以指数形式增长。自然环境中植物根系和地下生物能通过微生物影响 VOCs 的吸收或释放, 物种组成也可能会造成某些挥发性化合物释放的差异, 但确定其具体影响机制及区分微生物与植物根系的贡献仍需要更深入的研究 (Asensio *et al.* 2007b)。此外, 在土壤 VOCs 的吸收与释放与小生境因子密切相关, 如土壤温度、含水率、 CO_2 浓度及光照等非生物因素 (Kesselmeier *et al.* 1999)。因此, 马尾松林和阔叶林地表卤代烃通量的差异可能是两林地间动、植物及微生物群落和土壤性质等相关差异共同作用的结果。

2.2 外源加氮对森林地表卤代烃通量的影响

马尾松林施氮促进了地表氯甲烷、1,2-二氯丙烷、1,1,2-三氯乙烷、氯苯和 1,2,4-三氯苯的释放, 1,2-二氯丙烷、1,1,2-三氯乙烷、氯苯及 1,2,4-三氯苯由“汇”变为“源”, 中氮对地表卤代烃通量的影响显著 ($P < 0.05$)。低氮促进氯乙烯的吸收而中氮抑制其吸收。氯乙烷与顺式-1,2-二氯乙烯通量对氮沉降的响应则表现为氮沉降抑制其释放。氯乙烷通量在低氮处理下显著减小 ($P < 0.05$), 由“源”转为“汇” (图 2A)。

阔叶林中, 大部分卤代烃表现为释放, 如氯甲烷、氯乙烷、氯乙烯、顺式-1,2-二氯乙烯、1,1,2-三氯乙烷、氯苯和 1,2,4-三氯苯等。施氮降低了这些卤代烃的释放量或使阔叶林地表由“源”变为“汇”, 且低氮处理对这些物质具有显著影响 ($P < 0.05$) (图 2B)。氯甲烷、氯乙烯、氯苯及 1,2,4-三氯苯释放量均为对照 > 高氮 > 低氮, 说明低氮能显著抑制其释放, 但随施氮量增加, 卤代烃对氮处理的响应逐渐减

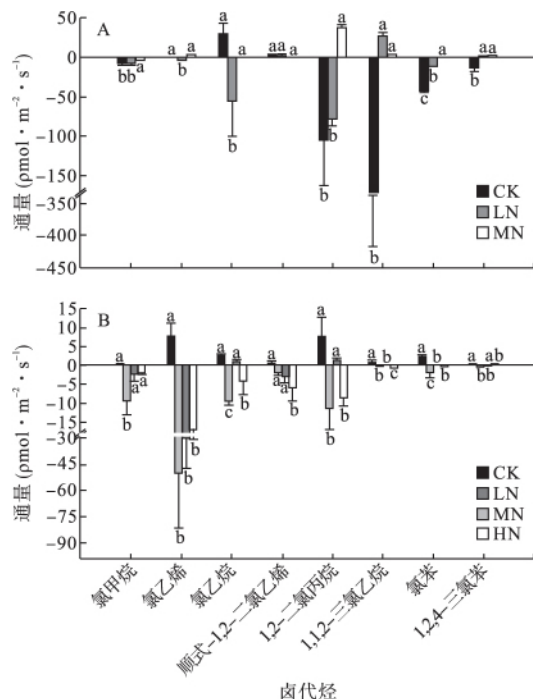


图2 氮沉降对马尾松林(A)和阔叶林(B)地表卤代烃通量的影响

Fig. 2 Effect of nitrogen deposition on VOX flux in PF (A) and BF (B) floor

不同字母表示卤代烃对不同氮沉降水平的响应存在显著差异 ($P < 0.05$)。

小。研究表明, 在缺氮的森林, 氮沉降能促进土壤微生物生长, 但当土壤氮含量达到饱和时则会表现出抑制效应 (Ball *et al.* 2014)。薛璟花等 (2007) 研究不同氮沉降水平对苗圃土壤微生物的影响, 发现, 低氮促进土壤细菌和放线菌数量, 达到中氮水平后则表现为抑制作用。袁颖红等 (2013) 也发现, 低氮处理提高土壤微生物生物量碳和微生物 Shannon 指数, 中氮和高氮处理则表现为抑制。因此, 本研究氮沉降对 VOX 影响的结果可能是由于阔叶林接受长期外源氮的输入, 土壤氮的有效性相对较高, 少量氮输入增加了吸收卤代烃的微生物活性, 从而加强了地表对卤代烃的吸收; 随土壤氮量增加, 微生物活性受到抑制, 吸收能力逐渐减弱。然而, 部分化合物存在不同响应, 如顺式-1,2-二氯乙烯和 1,1,2-三氯乙烷通量表现为对照 > 低氮 > 高氮。

整体而言, 马尾松林氮沉降降低了大部分卤代烃的吸收, 甚至使地表由“汇”变为“源”; 而阔叶林氮沉降则主要表现为抑制卤代烃的释放或使地表由“源”变为“汇” (图 2)。同一林型不同处理样地中卤代烃通量存在差异可能是由于释放或吸收这些化合物的源 (微生物) 不同, 而这些微生物或植物对外

表2 马尾松林和阔叶林卤代烃通量单因素方差分析
Table 2 One-way ANOVA analysis of VOX flux between PF and BF

卤代烃	CK		LN		MN	
	F	P	F	P	F	P
氯甲烷	57.861	0.002	0.963	0.382	0.048	0.838
氯乙烯	12.143	0.025	6.087	0.069	9.346	0.038
氯乙烷	12.336	0.025	3.100	0.153	10.027	0.034
顺式-1,2-二氯乙烯	11.270	0.028	8.087	0.047	9.350	0.038
1,2-二氯丙烷	11.276	0.028	130.261	0.000	167.156	0.000
1,1,2-三氯乙烷	18.295	0.013	82.957	0.001	152.304	0.000
氯苯	3740.212	0.000	107.185	0.000	6.497	0.063
1,2,4-三氯苯	12.831	0.023	5.843	0.073	7.003	0.057

源氮的输入及其施氮量的响应同样存在差异,又进一步影响了地表卤代烃通量,具体影响机制有待于进一步研究。

自然氮沉降下,马尾松林和阔叶林间卤代烃通量存在显著性差异($P < 0.05$) (表2),这可能是两种森林类型土壤性质、微生物群落结构与生物量和凋落物组成差异的原因。加氮处理下,顺式-1,2-二氯乙烯、1,2-二氯丙烷和1,1,2-三氯乙烷林型间差异仍然显著,但氯甲烷和1,2,4-三氯苯通量林型间已无显著差异($P > 0.05$),说明外源氮的添加能减弱森林类型对氯甲烷与1,2,4-三氯苯的释放与吸收造成的差异。低氮处理下氯乙烷与氯乙烯林型间差异消失($P > 0.05$),但在中氮样地差异再次出现。氯苯通量在对照及低氮处理下森林类型间均有显著差异($P < 0.01$),但中氮处理下无显著差异($P > 0.05$),说明氮输入会减弱林地差异对氯苯通量的影响,当超过某一氮沉降限值,氯苯的释放与吸收情况可能趋于一致。这主要是由于阔叶林土壤氮含量较丰富,而马尾松林为人工林,土壤氮含量相对较少,在大量氮源的输入下,弥补了马尾松林氮量过少的现状,从而影响两森林间卤代烃通量的差异。

施氮处理后,马尾松林中氯乙烯与1,2-二氯丙烷、1,1,2-三氯乙烷显著相关($P < 0.01$),阔叶林中

氯甲烷与氯乙烯、氯乙烷、氯苯显著相关($P < 0.01$)。氯苯与其他卤代烃基本都具有显著的相关性($P < 0.05$) (表3),表明某些卤代烃的吸收与释放可能具有相似的途径或者受相同的条件影响(Wu-osmaa *et al.*, 1990; Saini *et al.*, 1995)。目前,这些关系没有清晰的理论基础,还有待于进一步研究。

2.3 卤代烃日变化

阔叶林对照样地地表卤代烃通量日变化在 $-28.94 \sim 7.72 \text{ pmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图3A),而高氮样地地表卤代烃通量日变化为 $-399.29 \sim 47.55 \text{ pmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图3B),说明高氮降低了地表卤代烃的释放,与前文结果一致。对照样地卤代烃未表现出明显的日变化规律性,但高氮样地基本表现一致,且在07:00出现一个小峰,且最大吸收量主要出现在13:00点,而后趋于平缓。可能是由于阔叶林中温度和湿度等环境因子变化较小,无法大幅度地改变卤代烃的吸收或释放,而高氮样地氮沉降增加可能影响了释放或吸收卤代烃的某些功能微生物,从而改变卤代烃日变化(薛璟花等, 2007; Ramirez *et al.*, 2010)。夜间温度较低,土壤微生物与酶活性降低导致卤代烃通量变化不明显。

在阔叶林卤代烃日变化的研究中,两样地土壤温度均在 $15.6 \sim 16.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$,尽管变化幅度较小,但仍发现一些卤代烃通量与土壤温度呈显著负相关,如1,1,2-三氯乙烷($r = -0.877$, $P = 0.004$)和氯苯($r = -0.860$, $P = 0.006$)。此外,1,2,4-三氯苯与土壤湿度极显著相关($r = -0.964$, $P = 0.000$),与Asensio等(2007a)研究结果一致:土壤湿度增加会加强土壤对VOCs的吸收能力,从而使土壤变成VOCs更大的“汇”。卤代烃的吸收与释放是一个复杂的过程,与植物根系、土壤微生物及酶活性密切相关,而土壤湿度及温度变化能引起土壤微生物活性发生改变,因此,解释卤代烃日变化规律需要深入研究参与VOX吸收或释放的相关植物与微生物及其对土壤温湿度

表3 马尾松林和阔叶林施氮样地地表卤代烃相关系数
Table 3 Correlation coefficients between VOX in PF and BF floor with nitrogen treatment

卤代烃	氯甲烷		氯乙烯		氯乙烷		1,2-二氯丙烷		1,1,2-三氯乙烷		氯苯	
	PF	BF	PF	BF	PF	BF	PF	BF	PF	BF	PF	BF
氯甲烷	1	1										
氯乙烯	0.893*	0.869**	1	1								
氯乙烷	0.473	0.738*	0.679	0.507	1	1						
1,2-二氯丙烷	0.800	0.603	0.943**	0.373	0.750	0.862**	1	1				
1,1,2-三氯乙烷	-0.754	0.007	-0.927**	-0.625	-0.882*	0.324	-0.969**	0.620	1	1		
氯苯	0.814*	0.934**	0.958**	0.783*	0.747	0.729*	0.999**	0.676*	-0.971**	0.197	1	1

* 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。

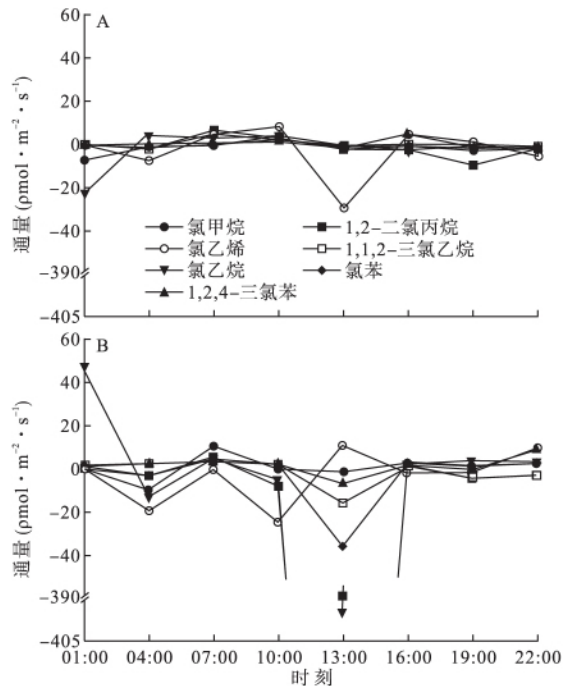


图3 阔叶林对照样地(A)和高氮样地(B)地表卤代烃通量日变化

Fig. 3 Diurnal variations of VOC flux in BF floor without N (A) and with HN (B) treatment

和氮沉降的响应。

3 结论

对照样地,马尾松林地表面主要吸收卤代烃,而阔叶林地表面主要排放卤代烃。氮增加抑制了马尾松林地卤代烃的吸收,其影响效果为中氮>低氮>对照,且在中氮处理下,地表卤代烃通量吸收转变为释放;阔叶林氮处理样地,施氮则促进地表卤代烃的吸收,地表卤代烃由释放转变为吸收。因此,外源氮输入将改变森林地表的功能,从而可能改变区域环境,这可能是外源氮输入能影响植物代谢过程、引起植物营养失衡,促进或抑制微生物活性。

阔叶林为成熟的演替后期森林,结构功能完整,而马尾松林正在不断演替中,易受外界条件的干扰,且两森林样地小生境存在一定差异,故两森林类型卤代烃通量差异较大。长期氮沉降后,阔叶林氮含量较高或近饱和,少量氮源的输入就能改变地表卤代烃源汇的转换;马尾松林氮含量相对较少,外源氮量的添加需超过一定阈值才能使土壤功能发生改变,影响卤代烃通量变化。因此,在评价森林生态系统对区域环境的影响时,需考虑不同森林类型的影响。

自然氮沉降下,阔叶林地表面卤代烃通量日变化规律不明显。但氮沉降增加后,卤代烃变化较为一致,这可能是氮的输入改变了某些功能微生物,从而表现出对土壤温度及湿度的响应较敏感且一致。

参考文献

- 李秋玲,肖辉林,曾晓舵,等. 2013. 模拟氮沉降对森林土壤化学性质的影响. *生态环境学报*, **22**(12): 1872–1878.
- 刘效东,周国逸,陈修治,等. 2014. 南亚热带森林演替过程中小气候的改变及对气候变化的响应. *生态学报*, **34**(10): 2755–2764.
- 鲁显楷,莫江明,董少峰. 2008. 氮沉降对森林生物多样性的影响. *生态学报*, **28**(11): 5532–5548.
- 薛璟花,莫江明,李炯,等. 2007. 土壤微生物数量对模拟氮沉降增加的早期响应. *广西植物*, **27**(2): 174–179.
- 袁颖红,樊后保,刘文飞,等. 2013. 模拟氮沉降对杉木人工林(*Cunninghamia lanceolata*)土壤酶活性及微生物群落功能多样性的影响. *土壤*, **45**(1): 120–128.
- 张燕,崔学民,樊明寿. 2007. 大气氮沉降及其对草地生物多样性的影响. *草业科学*, **24**(7): 12–17.
- 郑丽丽,郭萍萍,易志刚. 2015. 鼎湖山典型森林土壤苯系物通量对模拟氮沉降的响应. *生态环境学报*, **24**(3): 396–401.
- 周国逸,闫俊华. 2001. 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. *生态学报*, **21**(12): 2002–2012.
- Asensio D, Peñuelas J, Filella I, et al. 2007a. On-line screening of soil VOCs exchange responses to moisture, temperature and root presence. *Plant and Soil*, **291**: 249–261.
- Asensio D, Peñuelas J, Ogaya R, et al. 2007b. Seasonal soil voc exchange rates in a Mediterranean holm oak forest and their responses to drought conditions. *Atmospheric Environment*, **41**: 2456–2466.
- Ball BA, Virginia RA. 2014. Microbial biomass and respiration responses to nitrogen fertilization in a polar desert. *Polar Biology*, **37**: 573–585.
- Frische M, Garofalo K, Hansteen TH, et al. 2006. Fluxes and origin of halogenated organic trace gases from Momotombo volcano (Nicaragua). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **7**, doi: 10.1029/2005GC001162.
- Gray CM, Fierer N. 2012. Impacts of nitrogen fertilization on volatile organic compound emissions from decomposing plant litter. *Global Change Biology*, **18**: 739–748.
- Gribble GW. 1994. The natural production of chlorinated compounds. *Environmental Science & Technology*, **28**: 310A–931A.
- Gribble GW. 2003. The diversity of naturally produced organohalogenes. *Chemosphere*, **52**: 289–297.
- Huang WJ, Zhang DQ, Li YL, et al. 2012. Responses of soil acid phosphomonoesterase activity to simulated nitrogen deposition in three forests of subtropical China. *Pedosphere*, **22**: 698–706.

- Ken S , Adgate JL , Gurumurthy R , *et al.* 2004. Comparison of personal , indoor , and outdoor exposures to hazardous air pollutants in three urban communities. *Environmental Science & Technology* , **38**: 423 – 430.
- Kesselmeier J , Staudt M. 1999. Biogenic volatile organic compounds (VOC) : An overview on emission , physiology and ecology. *Journal of Atmospheric Chemistry* , **33**: 23 – 88.
- Khalil MAK , Moore RM , Harper DB , *et al.* 1999. Natural emissions of chlorine-containing gases: Reactive chlorine emissions inventory. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* , **104**: 8333 – 8346.
- Liu C , Du Y , Guo H , *et al.* 2000. Analyses of volatile organic compounds concentrations and variation trends in the air of Changchun , the northeast of China. *Atmospheric Environment* , **34**: 4459 – 4466.
- Mo J , Brown S , Xue J , *et al.* 2006. Response of litter decomposition to simulated N deposition in disturbed , rehabilitated and mature forests in subtropical China. *Plant and Soil* , **282**: 135 – 151.
- Molina MJ , Rowland FS. 1974. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atomic catalyzed destruction of ozone. *Nature* , **249**: 810 – 812.
- Ramirez KS , Lauber CL , Fierer N. 2010. Microbial consumption and production of volatile organic compounds at the soil-litter interface. *Biogeochemistry* , **99**: 97 – 107.
- Roy R , Pratihary A , Narvenkar G , *et al.* 2011. The relationship between volatile halocarbons and phytoplankton pigments during a trichodesmium bloom in the coastal eastern Arabian Sea. *Estuarine Coastal & Shelf Science* , **95**: 110 – 118.
- Ruecker A , Weigold P , Behrens S , *et al.* 2014. Predominance of biotic over abiotic formation of halogenated hydrocarbons in hypersaline sediments in western Australia. *Environmental Science & Technology* , **48**: 9170 – 9178.
- Saini HS , Attieh JM , Hanson AD. 1995. Biosynthesis of halomethanes and methanethiol by higher plants via a novel methyltransferase reaction. *Plant , Cell & Environment* , **18**: 1027 – 1033.
- Solomon S , Mills M , Heidt LE , *et al.* 1992. On the evaluation of ozone depletion potentials. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* , **97**: 825 – 842.
- Watling R , Harper DB. 1998. Chloromethane production by wood-rotting fungi and an estimate of the global flux to the atmosphere. *Mycological Research* , **102**: 769 – 787.
- Wei Z , Mo J , Yu G , *et al.* 2008. Emissions of nitrous oxide from three tropical forests in southern China in response to simulated nitrogen deposition. *Plant and Soil* , **306**: 221 – 236.
- Wuosmaa AM , Hager LP. 1990. Methyl chloride transferase: A carbocation route for biosynthesis of halometabolites. *Science* , **249**: 160 – 162.

作者简介 吴旺旺 男 ,1991 年生 ,硕士研究生 ,主要从事环境生态学研究。E-mail: w. u55555@163. com
责任编辑 张 敏
