

不同区域森林表层土壤甲烷和乙烯氧化特性及影响机制

魏 晋^{1,2}, 徐星凯², 黄 耀², 王跃思²

(1.南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095; 2.中国科学院大气物理研究所 大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要:采集我国长白山、西双版纳和鼎湖山森林表层土壤(5 cm),通过一系列实验室培养来研究不同区域典型森林土壤甲烷和乙烯氧化潜势、差异机制以及乙烯对甲烷氧化的影响效应。结果表明,温带森林土壤甲烷和乙烯氧化速率高于热带与亚热带土壤,并具有较高的最大甲烷氧化速率(V_{max})。所有森林土壤甲烷氧化的半饱和常数(K_m)变化范围较大,从而显示不同区域以及同区域不同植被下土壤甲烷氧化特性具有差异性。通过比较在相同起始碳浓度时热带不同土地利用、热带与亚热带森林以及温带不同林型土壤甲烷和乙烯氧化特性的差异,发现甲烷氧化对土地利用、气候条件与植被变化的敏感度显著高于乙烯氧化。在高浓度乙烯(约 $20 \mu\text{L C}_2\text{H}_4 \cdot \text{L}^{-1}$)存在时,发现所选择的不同区域森林土壤氧化大气本底甲烷潜势均被抑制,抑制率为 83%~100%,尤其是热带土壤。因子分析和回归分析显示,影响这些森林土壤甲烷和乙烯氧化的主要因子是水/盐溶性有机碳和有机氮以及微生物碳氮。

关键词:甲烷; 乙烯; 氧化; 森林土壤; 微生物量; 溶解性有机碳氮

中图分类号: S152.6 文献标识码: A 文章编号: 1672-2043(2008)01-0273-06

Methane and Ethylene Consumption by Forest Surface Soils from Different Zones and Driving Mechanisms

WEI Jin^{1,2}, XU Xing-kai², HUANG Yao², WANG Yue-si²

(1.College of Resource and Environment Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2.State Key Laboratory of Atmosphere Boundary Layer Physics and Atmosphere Chemistry, Institute of Atmosphere Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Forest surface soils were sampled at 0~5 cm under temperate, sub-tropical and tropical forests, which were respectively located in Changbai mountain, Dinghushan mountain and Xishuangbanna district in China. A series of laboratory incubations were done to study the differences in methane (CH_4) and ethylene (C_2H_4) consumption by the soils at a same initial carbon concentration (about $40 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ C as CH_4 and C_2H_4), and the differences in soil atmospheric CH_4 consumption in the presence and absence of approximately $20 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ C_2H_4 in the headspace. There was a larger consumption potential of CH_4 and C_2H_4 , and a larger maximum oxidation rate of CH_4 (V_{max}) in temperate forest soils than in subtropical and tropical forest soils. The half saturation constant (K_m) for CH_4 oxidation changed greatly among the soils, indicating that the CH_4 oxidation characteristics varied with different sites and with different vegetations at each site. Through comparing soil CH_4 and C_2H_4 consumption at approximately $40 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ C as initial CH_4 and C_2H_4 , it was observed that soil CH_4 consumption was more sensitive to the variations of land use in tropical zone, climatic condition and vegetations than the C_2H_4 consumption. In the presence of ethylene (about $20 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ C_2H_4), the soil atmospheric CH_4 consumption was inhibited by 83%~100%, with a maximal inhibition in tropical soils. Both factor analysis and regression analysis showed that soil water/salt extractable organic carbon and nitrogen, and soil microbial biomass were the main factors influencing CH_4 and C_2H_4 consumption in the soils.

Keywords: methane; ethylene; oxidation; forest soils; microbial biomass; dissolvable organic C and N

收稿日期: 2007-03-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(20777071); 中国科学院“百人计划”项目(20477044)

作者简介: 魏 晋(1982—), 女, 硕士研究生, 从事森林土壤甲烷和乙烯氧化研究。

通讯作者: 徐星凯 E-mail: xingkai_xu@yahoo.com.cn

排水良好的非耕地(包括林地)可以吸收大气甲烷,其吸收量约占 $30 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$,同时也具有很强的吸收大气乙烯的能力。森林地表土壤及凋落物通常含有丰富的有机质且微生物活性高,在水分适宜时可以促进乙烯产生^[2],尤其是水分饱和时的针叶林地表^[3],这样可能影响到林地吸收大气甲烷的能力。土壤微生物仅有细菌对甲烷产生和氧化起作用,然而土壤产生和氧化乙烯的微生物具有广谱性。不同微生物的参与机制可能使得森林土壤甲烷和乙烯氧化的对比研究具有挑战性。已报道在相同的实验条件下,温带森林土壤具有相似的甲烷和乙烯氧化潜势,在乙烯存在时可能抑制林地吸收大气甲烷的能力^[4,5]。目前类似研究甚少,仅仅限于温带森林土壤甲烷氧化研究,未见阐述不同区域典型森林表层土壤甲烷和乙烯氧化能力的比较、差异机制以及乙烯对不同林地土壤甲烷氧化的影响效应。这些问题的深入研究有助于正确认识森林土壤吸收大气甲烷和乙烯的特性及其调节机制。

为此,本文分别采集我国温带、亚热带和热带典型林地表层土壤,通过一系列室内培养实验,探讨森林土壤甲烷和乙烯氧化潜势、差异机制以及乙烯对甲烷氧化的影响效应。

1 材料与方法

1.1 土壤采集与属性测定

本次研究所用的温带、热带和亚热带森林土壤分别采集于我国长白山温带森林自然保护区、西双版纳热带雨林生态站和广东鼎湖山亚热带森林自然保护区,3个地区年均气温分别约为 4.1 、 21.5 和 20.9 °C,年均降雨量分别约为 855 、 1557 和 1564 mm。温带长白山地区不同海拔及林型的表层土壤包括阔叶红松林(KP, 740 m)、云冷杉林(SF, 1680 m)、岳桦林(BF, 1910 m)和苔原带(TD, >2100 m)土壤;热带森林土壤分别采集热带季雨林(RF)、雨林砍伐后的次生橡胶林(RB)和茶园(TG);亚热带森林土壤包括相似海拔高度(约 300 m)的马尾松林(PF)、针阔混交林(MF)、季风常绿阔叶林(MEBF)和森林砍伐后茶园土壤(DTG)。

在各林地随机选择 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 范围并去除地表凋落物,利用环刀采集 $0\sim 5 \text{ cm}$ 土壤(一般为 $6\sim 8$ 个点),混合后作为 1 个样品。温带与热带森林土壤以相似方法采 4 个重复样,亚热带森林取 6 个重复样。新鲜土壤样品过 2 mm 筛,在 $0\sim 5$ °C 冷藏柜中保存;部分样品风干以备有关属性测定。土壤总 C 和总 N 含量通过 MT-700 碳氮分析仪测定。利用去离子水和 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

KCl 溶液分别浸提土壤(土:液 = $1:5$, m/m),浸提液通过岛津 $\text{TOC-V}_{\text{CSH}} / \text{TN}$ 测定土壤水/盐溶性有机碳和总氮含量;比色法测定土壤水/盐浸提液 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量^[6]。土壤 DON 含量为土壤 DN 与 $(\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N})$ 含量的差值。土壤经好气预培养 7 d 后,采用氯仿熏蒸灭菌提取,TOC/TN 分析仪测定土壤浸提液有机碳和总氮量^[7,8]。土壤微生物碳氮含量为氯仿熏蒸前后土壤浸提液 TOC/TN 含量的差值除以 0.45 ^[8,9]。供试土壤基本属性见表 1。

1.2 森林土壤甲烷和乙烯氧化实验

1.2.1 森林土壤大气背景甲烷氧化

称取 20.0 g 鲜土放入 250 mL 细口培养瓶中,调节土壤含水量约为最大持水量 45% 。用插入针头的胶塞密封瓶口,针头上方接三通阀,密封前于培养箱中 25 °C 黑暗预培养 24 h 来稳定微生物活性。预培养结束后,密封瓶口并立即测定 0 时甲烷浓度,此后每隔 $6\sim 10$ 小时测定一次,每次测定结束后立即放回培养箱。在 25 °C 黑暗培养 24 h 内共采样分析 $2\sim 4$ 次。每个土壤样品为一个重复样。

1.2.2 森林土壤高浓度甲烷氧化

称取 20.0 g 鲜土放入 250 mL 细口培养瓶中,调节土壤含水量约为最大持水量 45% 。预培养 24 h ,密封后向瓶内注入高浓度甲烷,使瓶内甲烷浓度约为 $40 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$,并立即测定培养开始时甲烷浓度,约 16 h 左右测定第二次,此后每隔 24 h 测定一次,培养 $7\sim 10 \text{ d}$ 。每个土壤样品为一个重复样。

1.2.3 高浓度乙烯氧化及其对大气本底甲烷氧化的影响

称取 20.0 g 鲜土放入 250 mL 细口培养瓶中,调节土壤含水量约为最大持水量 45% 。预培养 24 h ,密封后向瓶内注入高浓度乙烯,使瓶内乙烯浓度约为 $20 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$,以比较在相同起始碳浓度时土壤甲烷和乙烯氧化差异以及高浓度乙烯对大气本底甲烷氧化的影响效应。注入乙烯后立即取样,测定培养开始时乙烯和甲烷浓度,约 16 h 左右测定第二次,此后每隔 24 h 测定一次甲烷和乙烯浓度,培养 $7\sim 10 \text{ d}$ 。每个土壤样品为一个重复样。

1.2.4 甲烷和乙烯测定

甲烷和乙烯用 HP 5890 Series 型气相色谱仪测定,检测器为 FID,温度为 200 °C;色谱柱为 2 m porapak Q,柱温为 55 °C;载气为高纯 N_2 ,流量为 $30 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。标准气体由国家标准物质中心提供,甲烷和乙烯浓度分别为 2.11 和 $4.60 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$,氮气为平衡气。

1.3 计算与统计分析

表 1 不同区域森林表层(0-5 cm)土壤基本属性

Table 1 Main attributes of 0-5 cm forest soils under different climatic zones

土壤类型	pH (水)	水溶性有机碳	水溶性有机氮	盐溶性有机碳 /mg · kg ⁻¹	盐溶性有机氮	微生物碳	微生物氮
温带森林							
KP	5.3	140	39	200	232	3 770	698
SF	5.1	153	4	159	92	1 323	285
BF	5.0	244	3	227	54	2 052	465
TY	5.1	146	5	181	30	1 143	224
热带森林							
RF	5.7	71	0	107	38	624	110
RB	5.5	76	0	104	30	429	70
TG	4.7	62	0	119	9	204	40
亚热带森林							
MEBF	4.0	55	1	45	2	535	95
PF	4.1	71	0	28	0	308	51
MF	4.1	101	0	58	0	650	106
DTG	4.7	51	0	36	0	306	52

注:RF、RB 和 TG 分别代表热带雨林、雨林砍伐后橡胶林和茶园土壤;KP、SF、BF 和 TD 分别代表温带阔叶红松林、云冷杉林、岳桦林和苔原带土壤;MEBF、PF、MF 和 DTG 分别代表亚热带季风常绿阔叶林、马尾松林、针阔混交林和森林砍伐后茶园土壤。

根据单位培养时间内土壤消耗甲烷或乙烯的数量来计算气体氧化速率($R^2 > 0.95$), 计算公式为: $V = 1/W \times d(C_0 - C)/dt$, 其中 V 为甲烷或乙烯氧化速率($\text{pmol CH}_4/\text{C}_2\text{H}_4 - \text{C} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$); t 为培养时间(h); C_0 和 C ($\text{pmol CH}_4/\text{C}_2\text{H}_4 - \text{C} \cdot \text{mL}^{-1}$) 分别为 0 时和 t 时甲烷或乙烯的碳浓度; W 为培养瓶中土壤干重(g)。

根据气体反应动力学方程式: $V = V_{\max} C / (K_m + C)$, V 和 V_{\max} 分别为甲烷氧化速率和最大反应速率, 单位是 $\text{pmol CH}_4 - \text{C} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$; K_m 和 C 分别为半饱和常数和甲烷初始浓度, 单位均为 $\mu\text{L}^{-1} \text{CH}_4 \cdot \text{L}^{-1}$ 。该公式可变形为 $1/V = K_m/V_{\max} \times 1/C + 1/V_{\max}$ 。以 $1/V$ 为因变量, $1/C$ 为自变量, 进行线性回归, K_m/V_{\max} 和 $1/V_{\max}$ 分别为直线的斜率和截距, 再进一步计算出 V_{\max} 和 K_m 。

通过 $\text{LSD}_{0.05}$ 来比较不同土壤甲烷和乙烯氧化的差异($P < 0.05$), 利用 SPSS 因子分析了解不同区域森林土壤甲烷和乙烯氧化的主要影响因子, 并进行线性回归。

2 结果与讨论

2.1 不同区域森林土壤不同浓度甲烷氧化特性比较

大气本底浓度和高浓度甲烷时, 温带森林土壤甲烷氧化速率均高于热带与亚热带森林(表 2), 这与 Steudler 的报道一致^[10]。以前报道的长白山阔叶红松林甲烷吸收通量($11.7 \text{ g CH}_4 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)^[11]高于鼎湖山林地($3.3 \sim 7.7 \text{ g CH}_4 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)^[12]也证实了这一结论。

V_{\max} 是土壤在反应底物(甲烷)充足时所能达到的最大氧化速率。温带森林土壤甲烷氧化的 V_{\max} 均大于热带和亚热带森林($P \leq 0.05$)(表 2), 说明温带森林具有较大的甲烷氧化潜势。阔叶红松林的高浓度甲烷氧化速率和 V_{\max} 显著高于其他温带森林土壤($P \leq 0.05$), 具有相当大的甲烷氧化能力。其原因可能是阔叶红松林的海拔低于其他温带森林, 气候和环境条件等都比较适宜甲烷氧化微生物的生长, 其土壤微生物量最高也表明良好的生长环境促进土壤甲烷氧化(表 1)。在两种起始甲烷浓度下, 西双版纳热带季雨林土壤的甲烷氧化速率均高于森林砍伐后的次生橡胶林和茶园($P \leq 0.05$), 其中茶园土壤甲烷氧化速率最小。这表明土地利用方式影响林地甲烷氧化。西双版纳热带季雨林土壤甲烷氧化速率和 V_{\max} 值均显著高于鼎湖山林地($P \leq 0.05$)(表 2)。两地区纬度和年均气温相近, 但鼎湖山所处地区污染严重, 大气降水氮沉降为 $38.2 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[13], 土壤 pH 通常在 4.0 左右, 大大低于西双版纳季雨林土壤(表 1)。因此, 鼎湖山地区森林土壤酸度较低可能引起甲烷氧化能力显著低于热带季雨林土壤。通常森林土壤甲烷氧化微生物活性的最适 pH 值为 5.8^[14], 在 pH 4.8~6.0 范围内, 森林土壤甲烷氧化能力随 pH 增加而增大^[15]。

K_m 表示土壤甲烷氧化速率达到最大氧化速率一半时的甲烷浓度。土壤中存在低甲烷亲和力的甲烷氧化菌和高甲烷亲和力的甲烷氧化菌, 森林土壤以低

表 2 森林表层土壤甲烷和乙烯氧化速率及甲烷氧化动力学常数

Table 2 Consumption rate of methane and ethylene by forest surface soils and kinetics constants of methane consumption

土壤类型	大气本底 CH ₄ 氧化速率/ $\mu\text{mol C} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$		高浓度 CH ₄ 和 C ₂ H ₄ 氧化速率/ $\mu\text{mol C} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$		甲烷氧化动力学常数	
	添加乙烯 (2.12±0.08) $\mu\text{L CH}_4 \cdot \text{L}^{-1}$	未添加乙烯 (2.42±0.03) $\mu\text{L CH}_4 \cdot \text{L}^{-1}$	高浓度甲烷 (41.1±0.7) $\mu\text{L CH}_4 \cdot \text{L}^{-1}$	高浓度乙烯 (19.6±0.3) $\mu\text{L C}_2\text{H}_4 \cdot \text{L}^{-1}$	V_{max} / $\mu\text{mol CH}_4 \cdot \text{C} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$	K_m / $\mu\text{L CH}_4 \cdot \text{L}^{-1}$
温带森林						
KP	7.90±0.86	76.89±27.14	843.6±189.9	569.0±7.7	4 194.1±449.0	173.8±49.2
SF	5.53±1.42	39.25±13.69	267.2±62.5	511.2±72.1	514.8±36.5	44.5±17.6
BF	11.02±1.12	70.57±4.32	491.0±66.3	620.9±45.4	856.5±160.4	24.8±3.9
TD	4.56±0.76	47.94±9.27	228.5±17.7	321.2±16.7	332.3±10.8	17.1±5.9
LSD _{0.05}	3.31	49.42	325.7	134.2	736.9	81.2
热带森林						
RF	1.09±0.20	32.34±3.98	217.3±28.8	230.9±10.9	331.1±47.2	21.2±2.2
RB	0.33±0.12	9.90±2.55	61.2±10.5	183.8±16.5	111.1±23.4	33.0±12.11
TG	0	1.81±0.23	20.9±3.9	149.0±16.1	108.5±21.5	173.1±27.2
LSD _{0.05}	0.43	8.64	57.0	47.1	105.1	55.2
亚热带森林						
MEBF	0.37±0.05	2.85±0.40	40.4±4.0	98.6±9.4	208.9±49.4	200.6±64.1
PF	0.18±0.05	2.56±0.20	38.7±2.8	86.9±4.6	245.3±30.6	236.0±38.8
MF	0.09±0.03	2.51±0.47	36.6±6.1	156.5±4.9	145.9±22.5	147.7±26.3
DTG	0.07±0.03	2.72±0.43	33.3±4.7	83.7±8.6	93.7±13.0	83.0±9.9
LSD _{0.05}	0.13	1.15	13.4	21.2	93.9	118.0

注:1. 平均值±标准误,利用 LSD_{0.05} 比较同地区不同森林土壤甲烷或乙烯氧化速率的差异性,显著水平为 0.05;2. 土壤类型说明见表 1。

K_m 值高亲和力的氧化菌为主^[6]。表 2 中 K_m 分布在 17~201 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1} \text{CH}_4$ 之间,变化范围较大,说明不同区域以及同区域不同植被下土壤甲烷氧化特性具有明显差异性。

2.2 不同区域森林土壤甲烷与乙烯氧化特性比较

在相同起始碳浓度时 (40 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1} \text{CH}_4 / \text{C}_2\text{H}_4 - \text{C}$), 森林土壤乙烯氧化特性具有和甲烷氧化相似的规律, 即温带森林土壤乙烯氧化速率高于热带与亚热带森林土壤; 土地利用方式影响热带森林土壤乙烯氧化能力, 与甲烷氧化潜势变化相比, 影响强度相对较小 (表 2)。Rigler 等研究表明云杉林和落叶林土壤甲烷和乙烯氧化特性具有相同规律, 显示可能有相同微生物对它们的氧化起作用^[7]。Xu 等对日本火山灰发育的森林土壤的研究也得出相同的结论^[9]。

在相同起始碳浓度时, 温带、热带与亚热带森林土壤甲烷氧化速率占乙烯氧化的百分数分别为 87%、53% 和 38%, 并且在温带林地土壤该值高于热带和亚热带林地土壤 ($P \leq 0.05$) (表 2)。不同区域森林土壤甲烷氧化速率占乙烯氧化的百分数越小, 表明甲烷氧化对环境或气候条件变化的敏感度越大。针对纬度和年均气温相近的热带和亚热带地区, 与热带季雨林土壤

相比, 在相同起始碳浓度时亚热带森林土壤甲烷氧化速率的降低程度显著高于乙烯氧化速率的降低 (表 2)。温带森林土壤甲烷氧化速率随植被变化的影响效应显著, 然而乙烯氧化差异不明显 (表 2); 热带不同土地利用方式的变化导致土壤甲烷氧化的降低程度显著高于乙烯氧化的降低, 尤其是茶园土壤 (表 2)。由此可见, 森林土壤甲烷氧化对土地利用、气候条件与植被变化的敏感度显著高于土壤中乙烯氧化。

2.3 高浓度乙烯对森林土壤吸收大气本底甲烷的影响

添加乙烯 (20 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1} \text{C}_2\text{H}_4$) 时森林土壤大气本底甲烷氧化均有抑制作用 (表 2), 抑制率为 83%~100%。Jackel 等报道添加 10 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙烯后, 落叶林土壤大气本底甲烷氧化 98% 被抑制, 这种抑制由氧化甲烷和乙烯的微生物对甲烷单氧酶的竞争所引起^[4]。乙烯对温带、热带和亚热带林地土壤甲烷氧化的平均抑制率分别为 86%、98% 和 93%, 三者之间有显著性差异 ($P \leq 0.05$) (表 2)。这表明乙烯存在可显著影响森林土壤对大气本底甲烷的氧化能力, 尤其是热带和亚热带土壤。长白山土壤发育于火山玄武岩, 有机质和 Ca、Mg 含量丰富, 阔叶红松林土壤交换态 Ca 和 Mg 含量

高达 4 500 和 580 mg·kg⁻¹^[10],有利于土壤团粒的形成和稳定。同时甲烷氧化菌在团粒结构较好的壤土中可保护自己免受干扰^[9],这可能是乙烯存在对长白山森林土壤甲烷氧化的抑制程度相对较低的原因。这种乙烯抑制作用也因不同土地利用而发生变化,西双版纳茶园土壤甲烷氧化的抑制程度高于热带雨林和次生橡胶林($P \leq 0.05$)(表 2)。

2.4 影响不同区域土壤甲烷和乙烯氧化差异的因素

表 3 列出通过因子分析提取出两因子的特征向量,发现土壤 CH₄ 和 C₂H₄ 氧化与微生物碳氮、水/盐溶性有机碳和有机氮含量相关,线性回归方程系数及确定系数 R² 和 P 值见表 4。

3 个地区森林土壤甲烷和乙烯氧化与微生物 C 和 N 含量线性回归方程拟合较好, R² ≥ 0.70, 说明森林土壤甲烷和乙烯氧化差异与土壤微生物量的变化有重要关系,并且它们对这两种气体氧化的贡献程度相当。根据回归方程的 R² 值(表 4),水/盐溶性有机碳含量比水/盐溶性有机氮对森林土壤乙烯氧化潜势变化的贡献程度大。然而,对于林地土壤甲烷氧化,这种规律并不明显。在对 3 个地区土壤所获得的数据分别进行因子分析时,发现在长白山地区温带森林土壤,水/盐溶性有机氮含量对甲烷氧化的影响程度(R² 值)要高于水/盐溶性有机碳;3 个地区森林土壤微生物碳氮均与甲烷和乙烯氧化潜势呈现显著正相关。因此,土壤微生物碳氮、水/盐溶性有机碳和有机氮含量是影响不同地区森林土壤甲烷与乙烯氧化的主要因子,各自的贡献程度应不同生境而有所变化。

3 结论

(1)温带森林土壤甲烷和乙烯氧化速率高于热带与亚热带土壤,并具有较高的最大甲烷氧化速率(V_{max})。所有森林土壤甲烷氧化的半饱和常数(K_m)变化范围较大,从而显示不同区域以及同区域不同植被下土壤甲烷氧化特性具有明显差异性。甲烷氧化对土地利用、气候条件与植被变化的敏感度显著高于土壤中乙烯氧化。

(2)在高浓度乙烯(约 20 μL·L⁻¹ C₂H₄)存在时,发现所选择的不同区域森林土壤氧化大气本底甲烷潜势均被抑制,抑制率为 83%~100%,尤其是热带和亚热带土壤。

(3)影响不同区域森林土壤甲烷和乙烯氧化的主要因子是微生物碳氮、水/盐溶性有机碳氮,并且水/盐溶性有机碳含量对乙烯氧化的影响程度高于水/盐溶

表 3 森林表层土壤属性与高浓度甲烷和乙烯氧化因子分析特征向量

Table 3 Two eigenvectors from a principal component analysis of the standardized data of forest surface soil properties, and of methane and ethylene consumption at a leveled initial concentration

	主成分	
	1	2
土壤 pH(水)	0.530	0.030
水溶性有机碳	0.761	-0.554
水溶性有机氮	0.717	0.498
盐溶性有机碳	0.870	-0.326
盐溶性有机氮	0.900	0.373
水溶性总氮量	0.808	0.562
盐溶性总氮量	0.983	-0.093
水溶性 NH ₄ ⁺ -N	0.728	-0.582
盐溶性 NH ₄ ⁺ -N	0.453	-0.801
水溶性 NO ₃ ⁻ -N	0.437	0.827
盐溶性 NO ₃ ⁻ -N	-0.088	0.164
微生物碳含量	0.954	0.169
微生物氮含量	0.974	0.057
CH ₄ 氧化速率	0.911	0.116
C ₂ H ₄ 氧化速率	0.921	-0.269

表 4 森林表层土壤甲烷和乙烯氧化速率与土壤主要属性的线性回归系数

Table 4 Coefficients of linear regressions of CH₄ and C₂H₄ consumption by forest surface soils against main soil properties

x	y	a	b	R ²	P
水溶性有机碳	CH ₄	-84.7±57.4	2.6±0.5	0.364	<0.001
	C ₂ H ₄	-27.3±30.5	2.7±0.3	0.686	<0.001
水溶性有机氮	CH ₄	130.8±31.0	12.4±2.4	0.339	<0.001
	C ₂ H ₄	216.0±25.0	7.9±2.0	0.244	<0.001
盐溶性有机碳	CH ₄	-87.1±46.6	2.6±0.4	0.489	<0.001
	C ₂ H ₄	-5.7±23.7	2.4±0.2	0.769	<0.001
盐溶性有机氮	CH ₄	50.9±19.1	3.5±0.2	0.790	<0.001
	C ₂ H ₄	165.9±21.0	2.2±0.3	0.553	<0.001
微生物碳含量	CH ₄	-34.2±23.2	0.2±0.0	0.784	<0.001
	C ₂ H ₄	96.4±21.2	0.2±0.0	0.683	<0.001
微生物氮含量	CH ₄	-31.4±20.8	1.2±0.1	0.819	<0.001
	C ₂ H ₄	92.5±17.7	0.9±0.1	0.772	<0.001

注:回归方程为 $y=a+bx$, a, b 数值为平均值±标准误。

性有机氮。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2001[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.248-251.
- [2] 徐星凯, 袁 斌, 王跃思, 等. 土壤乙烯产生和氧化的研究进展[J]. 生态学报, 2005, 25(12):3354-3358.

- [3] Zechmeister-Boltenstern S, Nikodim L. Effect of water tension on ethylene production and consumption in montane and lowland soils in Austria[J]. *Eur J Soil Sci*, 1999, 50:425–432.
- [4] Jackel U, Schnell S, Conrad R. Microbial ethylene production and inhibition of methanotrophic activity in a deciduous forest soil[J]. *Soil Biol Biochem*, 2004, 36: 835–840.
- [5] Xu X K, Inubushi K. Production and consumption of ethylene in temperate volcanic forest surface soils[J]. *Eur J Soil Sci*, 2007, 58:668–679.
- [6] Kim H T. Soil sampling, preparation and analysis[M]. New York: Marcel Dekker, 1995.
- [7] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. *Soil Biol Biochem*, 1987, 19:703–707.
- [8] Brookes P C, Landman A, Pruden G, et al. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass in soils[J]. *Soil Biol Biochem*, 1985, 17:837–842.
- [9] Wu J, Brooks P C, Jenkinson D S. Evidence for the use of a control in the fumigation–incubation method for measuring microbial biomass carbon in soil[J]. *Soil Biol Biochem*, 1996, 28(4):511–518.
- [10] Steudler P A, Bowden R D, Melillo J M, et al. Influence of nitrogen fertilization on methane uptake in temperate forest soils[J]. *Nature*, 1989, 341:314–316
- [11] 肖冬梅, 王 森, 姬兰柱, 等. 长白山阔叶红松林土壤氮化亚氮和甲烷的通量研究[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(10):1855–1859.
- [12] 莫江明, 方运霆, 李德军, 等. 鼎湖山主要森林土壤 CO₂ 排放和 CH₄ 吸收特征[J]. *广西植物*, 2006, 26 (2): 142–147.
- [13] 周国逸, 闰俊华. 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.
- [14] Amaral J A, Ren T, Knowles R. Atmospheric methane consumption by forest soils and extracted bacteria at different pH values[J]. *Appl Environ Microbiol*, 1998, 64:2397–2402.
- [15] Xu X K, Inubushi K. Effects of N sources and methane concentrations on methane uptake potential of a typical coniferous forest and its adjacent orchard soil[J]. *Biol Fertil Soils*, 2004, 40:215–221.
- [16] Bender M, Conrad R. Kinetics of methane oxidation in oxic soils[J]. *Chemosphere*, 1993, 26:687–696.
- [17] Rigler E, Zechmeister-Boltenstern S. Oxidation of ethylene and methane in forest soils—effect of CO₂ and mineral nitrogen[J]. *Geoderma*, 1999, 90:147–159.
- [18] Xu X K, Han L, Wang Y S, et al. Influence of vegetation types and soil properties on microbial biomass carbon and metabolic quotients in temperate volcanic and tropical forest soils[J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 2007, 53: 430–440.
- [19] 李 俊, 同小娟, 于 强. 不饱和土壤 CH₄ 的吸收与氧化[J]. *生态学报*, 2005, 25(1):141–147.

致谢:作者感谢西双版纳热带雨林站沙丽清博士、长白山森林站韩士杰教授以及鼎湖山森林站张德强教授在样品采集时所给予的帮助。